



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA  
CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR 1900 MHZ**

**Carlos Humberto Chaperón**

Asesorado por el Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA  
CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR 1900 MHZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**CARLOS HUMBERTO CHAPERÓN**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMÁN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR 1900 MHZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de noviembre de 2010.



**Carlos Humberto Chaperón**

Guatemala 2 de abril de 2013

Sr.  
Coordinador del área de Electrónica  
Escuela de ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Sr. Coordinador:

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación del estudiante Carlos Humberto Chaperón, titulado: "PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR 1900 MHZ". El cual a mi juicio ha cumplido con todos los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Por lo que, tanto el autor del presente trabajo de graduación, como el suscrito en calidad de asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo. Solicitando continuar con el trámite correspondiente.

Atentamente,



Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 2762

**CARLOS GUZMAN SALAZAR**  
Ingeniero Electricista  
Coi. No. 2762



Ref. EIME 24. 2013  
Guatemala, 17 de ABRIL 2013.

Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
“PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN  
PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR  
1900 MHZ”, del estudiante Carlos Humberto Chaperón que  
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador Área Electrónica



S/O



REF. EIME 24. 2013.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; CARLOS HUMBERTO CHAPERÓN titulado: “PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR 1900 MHZ”, procede a la autorización del mismo.**

**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**



**GUATEMALA, 14 DE MAYO 2013.**



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA EN LA BANDA CELULAR 1900 MHZ**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Humberto Chaperón**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, junio de 2013

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mi novia**

Caresme Herrera, por ser esa persona que hace que todo se vea diferente, por apoyarme cuando más lo necesité.

### **Mis tíos**

Oscar Chaperón y Berónica de Chaperón, por su apoyo incondicional durante todos mis estudios.

### **Mis hermanos**

Carla y Fredy Chaperón, por ser mis amigos y poder contar con ellos en todo momento.

### **Mis compañeros**

Karlss Chanta, Jorge Paredes, Edson López, Félix Bravo, Daniel Raban, Gaspar Carillo y muchos otros que fueron parte importante en este logro, sin ellos no hubiera sido lo mismo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme un camino a seguir, dándome la oportunidad de hacer lo que más me gusta.
<b>Abuelos</b>	Lucio Chaperón (q.e.p.d.) y Fulvia de Chaperón (q.e.p.d.). Por su confianza y su apoyo incondicional.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de aprender en esta gran casa de estudios.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. TEORÍA DE LA PROPAGACIÓN DE RF .....	1
1.1. Ondas electromagnéticas .....	1
1.2. Fundamentos de propagación de las ondas electromagnéticas .....	3
1.2.1. Ondas de tierra .....	6
1.2.2. Onda de superficie.....	6
1.2.3. Ondas de espacio.....	6
1.2.4. Ondas de cielo.....	7
1.3. Mecanismos de propagación de las ondas electromagnéticas .....	7
1.3.1. Reflexión.....	8
1.3.1.1. Leyes de la reflexión.....	10
1.3.2. Difracción.....	11
1.3.2.1. Principio de Huygens.....	13
1.3.2.2. Fresnel.....	16
1.3.3. Refracción.....	17
1.3.3.1. Leyes de Refracción .....	18
1.3.3.2. Reflexión total y ángulo límite .....	21

1.3.4.	Dispersión .....	22
1.4.	Ecuación de onda .....	22
1.5.	Potencia de una onda electromagnética .....	29
1.6.	Penetración de las ondas electromagnéticas .....	31
1.6.1.	Atenuación .....	32
1.6.2.	Pérdidas básicas en propagación de ondas electromagnéticas .....	34
2.	MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	37
2.1.	Modelos de propagación en ambientes abiertos .....	39
2.2.	Pérdidas de propagación .....	43
2.3.	Modelo básico de propagación en el espacio libre .....	46
2.3.1.	Modelo de espacio libre .....	47
2.3.2.	Modelo de propagación de los 2 rayos o de plano de tierra .....	49
2.3.3.	Modelo de Egli .....	50
2.4.	Okumura, Hata y sus modelos relacionados .....	51
2.4.1.	Método de Okumura .....	51
2.4.2.	Método de Okumura-Hata .....	53
2.4.3.	Modelo CCIR .....	56
2.4.4.	Modelo Hata extendido (COST231) .....	57
2.4.5.	Modelo de Ikegami .....	59
2.4.6.	Modelo Walfisch-Bertoni .....	59
2.4.7.	Modelo de Lee .....	61
2.5.	Desvanecimientos en la propagación .....	64
2.5.1.	Desvanecimientos lentos .....	64
2.5.2.	Desvanecimientos rápidos .....	68
2.6.	Estadísticas de la envolvente de la señal recibida .....	69

3.	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	73
3.1.	Introducción .....	73
3.2.	Definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG).....	74
3.2.1.	Clasificación de los sistemas de información.....	76
3.2.2.	Estructura de un SIG .....	78
3.2.2.1.	Mapas interactivos.....	78
3.2.2.2.	Datos geográficos.....	78
3.2.2.3.	Modelos de geo procesamiento.....	78
3.2.2.4.	Modelos de datos. ....	78
3.2.2.5.	Metadatos .....	79
3.2.3.	Modelos digitales de terreno .....	79
3.3.	Integración de un sistema.....	81
3.4.	Aplicación de un SIG en las comunicaciones .....	82
3.5.	Elaboración de SIG .....	83
3.5.1.	Integración del SIG utilizado .....	87
4.	METODOLOGÍA.....	93
4.1.	Sujeto a investigar .....	93
4.2.	Clasificación de entornos.....	93
4.2.1.	Entorno urbano denso .....	95
4.2.2.	Entorno industrial comercial.....	95
4.2.2.1.	Edificios menores a cinco niveles .....	95
4.2.2.2.	Edificios mayores a cinco niveles .....	95
4.2.2.3.	Área industrial.....	96
4.2.3.	Entorno residencial denso .....	96
4.2.4.	Entorno residencial no denso .....	97
4.3.	Variables a medir.....	97
4.3.1.	Potencia de código de señal recibida .....	97
4.3.2.	Margen de desvanecimiento.....	98

4.4.	Definición de indicadores .....	98
4.5.	Muestra .....	99
4.5.1.	Urbana densa.....	101
4.5.2.	Industrial comercial .....	101
4.5.3.	Residencial denso .....	101
4.5.4.	Residencial no denso .....	102
4.6.	Equipo de medición.....	102
4.7.	Montaje del equipo de medición.....	104
4.8.	Proceso de medición.....	105
4.8.1.	Mediciones realizadas .....	105
4.8.1.1.	Primer escenario de medición: Zona Viva .....	106
4.8.1.2.	Segundo escenario de medición: Centro Histórico.....	107
4.8.1.3.	Tercer escenario de medición: Reformita.....	108
4.8.1.4.	Cuarto escenario de medición: Vista Hermosa.....	109
4.9.	Análisis numérico y estadístico de los datos tomados en campo .....	110
5.	VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS.....	123
5.1.	Comparación de cada uno de los modelos en los diferentes escenarios.....	124
5.1.1.	Escenario Zona Viva .....	124
5.1.2.	Escenario Centro Histórico.....	126
5.1.3.	Escenario Reformita .....	127
5.1.4.	Escenario Vista Hermosa .....	129

5.2.	Análisis de los errores cometidos por los tres diferentes modelos.....	130
5.2.1.	Valor Medio del Error entre mediciones y los modelos .....	130
5.2.2.	Desviación Estándar.....	131
5.2.3.	Error Medio Cuadrático.....	131
5.3.	Consecuencia práctica de los errores. ....	132
CONCLUSIONES .....		133
RECOMENDACIONES.....		135
BIBLIOGRAFÍA.....		137
ANEXOS.....		139





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Reflexión .....	9
2.	Reflexión de una onda .....	10
3.	Ángulos formados con la recta perpendicular para el rayo incidente y reflejado.....	11
4.	Principio de Huygens .....	13
5.	Principio de Huygens, demostración de la Ley de Refracción. ....	15
6.	Elipsoides de Fresnel .....	16
7.	Refracción de un frente de onda en la frontera entre dos medios.....	17
8.	Demostración de la Ley de Snell.....	19
9.	Reflexión total y ángulo límite .....	21
10.	Campo eléctrico y magnético propagándose .....	24
11.	Pérdidas en el espacio libre .....	33
12.	Niveles de atenuación en diferentes entornos .....	34
13.	Clasificación de los modelos de propagación. ....	39
14.	Potencia recibida en un terminal en movimiento.....	41
15.	Fenómenos que afectan a la señal recibida en un teléfono móvil.....	42
16.	Mecanismos involucrados en las pérdidas de propagación según la distancia.....	44
17.	Modelo espacio libre .....	47
18.	Mecanismos de propagación en ambiente urbano.....	48
19.	Modelo de dos rayos.....	49
20.	Curvas de Okumura. ....	52
21.	Parámetros modelo Walfisch-Bertoni.....	60

22.	Terminal móvil moviéndose alrededor de una antena omnidireccional.....	66
23.	Nivel de potencia recibido y nivel de potencia predicho.....	66
24.	Rayos reflejados en objetos próximos al terminal móvil. ....	69
25.	Funciones de densidad de probabilidad Rayleigh y Rice.....	72
26.	Sistema de Información Geográfica.....	76
27.	Clasificación de los sistemas de información.....	77
28.	Modelos digitales de terrenos .....	81
29.	Integración de las capas de un SIG .....	82
30.	Capa 1: mapa georreferenciado de la ciudad de Guatemala.....	84
31.	Capa 2: mediciones puntuales.....	85
32.	Capa 3: eje, calles y avenidas .....	86
33.	Capa 4: ubicación de las radio bases transmisoras.....	87
34.	Activación de la capa 1 o mapa georreferenciado .....	88
35.	Mapa georreferenciado con mediciones puntuales.....	89
36.	Visualización de las cuatro capas.....	90
37.	Datos de una muestra para un punto específico .....	91
38.	Entorno morfológico de la ciudad de Guatemala por zonas .....	100
39.	Diagrama de sistema de comunicación utilizado .....	104
40.	Montaje del equipo de medición .....	105
41.	Mediciones tomadas alrededor de radio base Zona Viva .....	106
42.	Mediciones tomadas alrededor de radio base Centro Histórico.....	107
43.	Mediciones tomadas alrededor de radio base Reformita.....	108
44.	Mediciones tomadas alrededor de radio base Vista Hermosa.....	109
45.	Nivel de señal Vs. distancia, Zona Viva .....	111
46.	Nivel de señal Vs. distancia, Centro Histórico .....	112
47.	Nivel de señal Vs. distancia, Reformita.....	113
48.	Nivel de señal Vs. distancia, Vista Hermosa.....	114

49.	Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Zona Viva.....	118
50.	Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Centro Histórico .....	119
51.	Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Reformita .....	120
52.	Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Vista Hermosa .....	121
53.	Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Zona Viva.....	125
54.	Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Centro Histórico .....	126
55.	Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Reformita .....	128
56.	Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Vista Hermosa .....	129

## TABLAS

I.	Índice de refracción de la luz amarilla, con longitud de onda de 589 nm.....	4
II.	División del espectro electromagnético y longitudes de onda .....	5
III.	Parámetros modelo de Lee .....	64
IV.	Muestras recolectadas en escenario Zona Viva.....	116

V. Valor medio del error, desviación estándar y error medio cuadrático. Para cada uno de los diferentes escenarios.....132

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$h_m$	Altura antena estación móvil (receptor)
$h_b$	Altura antena radio base (transmisor)
$\alpha_i$	Angulo de incidencia
$\alpha_r$	Angulo de reflexión
$A_t$	Atenuación por obstáculo
$E$	Campo eléctrico
$H$	Campo magnético
$cm$	Centímetro
$a$	Coefficiente modelo de regresión
$b$	Coefficiente modelo de regresión
$g(f(a))$	Composición de funciones
$\sigma$	Conductividad eléctrica
$d\beta$	Decibel
$D$	Densidad de campo eléctrico
$J$	Densidad de corriente de conducción
$B$	Densidad de flujo de campo magnético
$d_n$	Distancia enésima
$\sigma_e$	Desviación estándar
$\alpha_n$	Factores de corrección modelo Lee
$HF$	Frecuencia alta
$LF$	Frecuencia baja
$f$	Frecuencia de la onda

<b>EHF</b>	Frecuencia extremadamente alta
<b>VHF</b>	Frecuencia muy alta
<b>VLf</b>	Frecuencia muy baja
<b><math>f_c</math></b>	Frecuencia portadora
<b>SHF</b>	Frecuencia super elevada
<b>UHF</b>	Frecuencia ultra elevada
<b><math>f(a)</math></b>	Función
<b>G</b>	Ganancia (eléctrica)
<b><math>G_R</math></b>	Ganancia de la antena receptora
<b><math>G_T</math></b>	Ganancia de la antena transmisora
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>Hz</b>	Hertz
<b><math>\eta</math></b>	Índice de refracción
<b>KHz</b>	Kilohertz
<b>Km</b>	Kilometro
<b>log</b>	Logaritmo base diez
<b>ln</b>	Logaritmo base natural
<b><math>\lambda</math></b>	Longitud de onda
<b><math>\lambda_I</math></b>	Longitud de onda incidente
<b><math>\lambda_T</math></b>	Longitud de onda transmitida
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>mts</b>	Metros
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>L</b>	Pérdidas de propagación
<b><math>L_h</math></b>	Pérdidas de propagación modelo CCRI
<b><math>L_C</math></b>	Pérdidas de propagación modelo Cost231
<b><math>L_{lv}</math></b>	Pérdidas de propagación modelo de dos rayos
<b><math>L_{el}</math></b>	Pérdidas de propagación modelo espacio libre
<b><math>L_{rts}</math></b>	Pérdidas de propagación modelo Ikegami

$L_0$	Pérdidas de propagación modelo Okumura
$L_u$	Pérdidas de propagación modelo Okumura-Hata
$L_{EX}$	Pérdidas de propagación modelo Walfisch-Bertoni
$\mu_0$	Permeabilidad magnética del vacío
$\epsilon_0$	Permitividad del vacío
$P_m$	Potencia media
$P$	Potencia recibida
$P_{r0}$	Potencia recibida a 1 milla
$P_T$	Potencia transmitida
$F_n$	Radio enésimo de la zona de Fresnel
$RF$	Radio frecuencia
$R_x$	Receptor
$s$	Segundos
$l_n$	Superficie refractante n
$t$	Tiempo
$T_x$	Transmisor
$\mu_e$	Valor medio del error
$\omega$	Velocidad angular
$c$	Velocidad de la luz en el vacío
$v$	Velocidad de la luz en un medio particular





## GLOSARIO

<b>Antena</b>	Dispositivo (conductor metálico) diseñado con el objetivo de emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre.
<b>CAD</b>	Diseño Asistido por Computadora.
<b>Campo eléctrico</b>	Campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas.
<b>Campo magnético</b>	Campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas.
<b>Conductividad</b>	Medida de la capacidad de un material que deja pasar la corriente eléctrica, su aptitud para dejar circular libremente las cargas eléctricas.
<b>Coordenadas</b>	Sistema de referencia que utiliza las dos coordenadas angulares, latitud (norte y sur) y longitud (este y oeste).
<b>COST</b>	Cooperativa Europea para Investigación Científica Técnica.
<b>Decibel</b>	Décima parte de un bel, unidad logarítmica que expresa una proporción entre dos magnitudes.

<b>Drive Test</b>	Método de medición y evaluación de la cobertura, capacidad y calidad de servicio de una red de radio móvil.
<b>Electromagnetismo</b>	Rama de la física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría.
<b>Georreferenciación</b>	Posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas.
<b>Google Earth ®</b>	Programa informático similar a un sistema de información geográfica (SIG), que permite visualizar imágenes del planeta, combinando imágenes de satélite y mapas.
<b>GPS</b>	Sistema global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona o un vehículo.
<b>GSM</b>	Sistema global para las comunicaciones móviles.
<b>MapInfo ®</b>	Herramienta de Sistemas de Información Geográfica que le permite realizar diversos y complejos análisis geográficos ideales.
<b>MDT</b>	Modelo Digital de Terreno.

<b>Onda</b>	Propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio.
<b>PCS</b>	Servicio Personal de Comunicaciones.
<b>Permeabilidad</b>	Capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos.
<b>Permitividad</b>	Constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.
<b>Polígono</b>	Figura plana compuesta por una secuencia finita de segmentos rectos consecutivos que cierran una región en el espacio.
<b>RCSP</b>	Potencia de código de señal recibida.
<b>Receptor</b>	Aparato que sirve para recibir las señales eléctricas, telegráficas o telefónicas.
<b>Regresión</b>	Tendencia de una medición extrema a presentarse más cercana a la media en una segunda medición.
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica.
<b>SIT</b>	Sistema de Información Terrestre.

<b>Telecomunicaciones</b>	Toda emisión, transmisión y recepción de signos, señales, escritos e imágenes, sonidos e informaciones de cualquier naturaleza, por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos.
<b>Terminal móvil</b>	Dispositivo inalámbrico electrónico para acceder y utilizar los servicios de la red de telefonía celular o móvil.
<b>Transmisor</b>	Aparato que sirve para transmitir las señales eléctricas, telegráficas o telefónicas.

## RESUMEN

En este trabajo de graduación se presenta los modelos matemáticos obtenidos con mediciones hechas en la ciudad de Guatemala en la banda celular 1900 MHz, tomando en cuenta la topografía y morfología de construcción de la ciudad.

En el capítulo I se presenta la teoría de propagación de las ondas electromagnéticas, los mecanismos de propagación en el entorno y las características propias de una onda electromagnética.

En el capítulo II se revisan los diferentes modelos de propagación existentes hoy en día, los cuales se analizan, resaltando que los mismos fueron elaborados en base a principios electromagnéticos o mediciones realizadas en diferentes ciudades del mundo.

En el capítulo III se describe como se conforma un sistema de información geográfica, describiendo su aplicabilidad en un sistema de comunicación inalámbrica móvil.

En el capítulo IV se presenta la metodología utilizada en este trabajo de graduación, iniciando por la clasificación de los entornos morfológicos de la ciudad de Guatemala, las variables medidas, el equipo de medición utilizado finalizando con el análisis estadístico de cada uno de los diferentes escenarios en estudio.

En el capítulo V se realiza la verificación de los modelos obtenidos con base en las mediciones tomadas en cada uno de los diferentes escenarios, finalmente se verifica estadísticamente el comportamiento de los tres modelos comparados (modelo de Regresión, modelo Okumura-Hata y el modelo Cost231), con esto se verifica el nivel de confianza para la utilización de los modelos propuestos.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar un modelo de propagación de radio frecuencia, para cada uno de los diferentes escenarios propios de las distintas morfologías de construcción existentes en la ciudad de Guatemala en la frecuencia de 1900 MHz.

### **Específicos**

1. Definir y explicar los diferentes fenómenos que afectan la propagación de las ondas electromagnéticas.
2. Definir y explicar los principales modelos de predicción de propagación de las radio frecuencias, que son utilizados en las bandas de las comunicaciones inalámbricas.
3. Definir los modelos matemáticos de propagación de radio frecuencia de las diferentes morfologías de la ciudad de Guatemala.
4. Determinar los errores cometidos por los diferentes modelos utilizados, por medio de mediciones de señal en los distintos escenarios.
5. Relacionar sistemáticamente los datos obtenidos con curvas de estimación, para cada uno de los diferentes ambientes, para así encontrar el modelo que mejor se ajuste a cada uno de los diferentes escenarios.





## INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas (comunicaciones móviles), se dan cuando tanto emisor como receptor están en movimiento. La movilidad de estos dos factores que se encuentran en los extremos de la comunicación, hace que se excluya casi en su integridad la utilización de hilos (cables) para realizar la comunicación en dichos extremos. Por lo tanto utiliza básicamente la comunicación vía radio. Esta es una gran ventaja de la comunicación vía radio por la movilidad de los extremos de la conexión.

En los sistemas de comunicación móviles es necesario poder determinar las pérdidas en la propagación de las señales, se cuenta con modelos estadísticos basado en las topografías de diferentes ciudades alrededor del mundo.

Los modelos propuestos son estadísticos con mediciones hechas en la ciudad de Guatemala. La necesidad de estos modelos surge de la peculiaridad del ambiente de propagación en la misma. La distribución de las edificaciones, la arquitectura variada y especialmente los materiales de construcción utilizados hacen que el ambiente sea muy diferente al cual sirvió de base para los modelos estadísticos existentes.

Es muy importante contar con el modelo de propagación adecuado, para cada uno de los distintos escenarios de la ciudad de Guatemala, con el propósito de predecir de una mejor manera cómo se comportarán las señales de radio en nuestro entorno.

Estos modelos se obtienen por medio de mediciones del nivel potencia, muestreada en cada uno de los diferentes escenarios, el parámetro más importante a medir es la potencia con que llega la señal en las diferentes calles y avenidas de las zonas urbanas de la ciudad de Guatemala, las muestras se recolectaron en cada área de cobertura de cada transmisor instalado en cada uno de los escenarios.

Después de recopiladas las muestras, se realizó una regresión entre las muestras obtenidas. Para todas las muestras obtenidas se calculó la distancia desde la ubicación de la antena transmisora y se ajustaron los valores medidos con la ganancia de la antena en esa dirección, obteniendo de esta forma modelos matemáticos acordes a la morfología de la ciudad de Guatemala.

# 1. TEORÍA DE LA PROPAGACIÓN DE RF

La capacidad de radiar ondas electromagnéticas desde un sistema transmisor hacia el espacio, es de suma importancia para el desarrollo de las telecomunicaciones inalámbricas, las cuales, hoy por hoy, persiguen como uno de sus principales objetivos el proveer acceso remoto a los distintos servicios de información que estas ofrecen sin necesidad de una conexión física entre el receptor y el emisor.

Por ello la comprensión del uso de ondas electromagnéticas como interfaz para la transmisión de información es muy importante. Este capítulo tiene por objeto cubrir la teoría de propagación necesaria para exponer a fondo los diferentes fenómenos que ocurren en la propagación de las ondas electromagnéticas.

## 1.1. Ondas electromagnéticas

Una onda es una perturbación de alguna propiedad de un medio, que se propaga a través del espacio trasportando energía. Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio. Y sus aspectos teóricos están relacionados con la solución en forma de onda que admiten las ecuaciones de Maxwell. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse; es decir, pueden desplazarse por el vacío.

James Clerk Maxwell fue el primero en hacer la observación teórica de que: un campo electromagnético variable admite una solución cuya ecuación de

movimiento se corresponde a la de una onda. Eso sugería que el campo electromagnético era susceptible de propagarse en forma de ondas, tanto en un medio material como en el vacío. Esas observaciones llevaron a Maxwell a proponer que la luz visible realmente está formada por ondas electromagnéticas. En particular este modelo describe con exactitud cómo se puede propagar la energía en forma de radiación por el espacio en forma de vibración de campos eléctricos y magnéticos. Sin embargo, las propuestas de Maxwell ocasionaron cierto debate, especialmente dos cuestiones:

- La posibilidad de la propagación de las ondas en el vacío suscitó ciertas dudas en su momento. Ya que la idea de que una onda se propagara de forma auto sostenida en el vacío resultaba extraña, razón por la cual años antes había nacido la teoría del éter.
- Además las ecuaciones de Maxwell sugerían que la velocidad de propagación en el vacío era constante, para todos los observadores. Eso llevó a interpretar la velocidad de propagación constante de las ondas electromagnéticas como la velocidad a la que se propagaban las ondas respecto a un supuesto éter inmóvil que sería un medio material muy sutil que invadiría todo el universo. Sin embargo, el famoso experimento de Michelson y Morley descartó la existencia del éter y quedó inexplicado hasta que Albert Einstein, Poincaré, H. Lorentz y otros, explicarían la constancia de la velocidad de la luz como una constante de las leyes de la física. (la teoría especial de la relatividad extiende la constante de propagación de la luz a todo fenómeno físico, no sólo las ondas electromagnéticas).

Sin embargo a pesar de todas esas cuestiones los primeros experimentos para detectar físicamente las ondas electromagnéticas, diferentes de la luz, fueron llevados a cabo por Heinrich Hertz en 1888, gracias a que fue el primero en construir un aparato que emitía y detectaba ondas electromagnéticas VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency).

## 1.2. Fundamentos de propagación de las ondas electromagnéticas

La velocidad de la luz dentro de una sustancia material generalmente es menor que la velocidad en el espacio libre, donde es de  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . En el agua, la velocidad de la luz es casi de  $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ , la cual es casi equivalente a las tres cuartas partes de su velocidad en el aire. La luz viaja aproximadamente a dos tercios de esa velocidad en el vidrio, o sea a unos  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ . La relación de la velocidad de la luz  $c$  en el vacío entre la velocidad  $v$  de la luz en un medio particular se llama índice de refracción  $n$  para ese material. El índice de refracción  $n$  de un material particular es la razón de la velocidad de la luz en el espacio libre con respecto a la velocidad de la luz a través del material.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

El índice de refracción es una cantidad adimensional y generalmente es mayor que la unidad. La tabla I, muestra los índices de refracción de diversas sustancias de uso común. Observe que los valores allí señalados se aplican al caso de una luz amarilla de 589 nm de longitud de onda. La velocidad de la luz en sustancias materiales es diferente para longitudes de onda diferentes. Este efecto, conocido como dispersión. Cuando la longitud de onda de la luz no se especifica, se suele, suponer que el índice corresponde al que tendría una luz amarilla.

Tabla I. **Índice de refracción de la luz amarilla, con longitud de onda de 589 nm**

Sustancia	<i>n</i>	Sustancia	<i>n</i>
Benceno	1.50	Glicerina	1.47
Disulfuro de carbono	1.63	Hielo	1.31
Diamante	2.42	Cuarzo	1.54
Alcohol etílico	1.36	Sal de roca	1.54
Fluorita	1.43	Agua	1.33
Vidrio:		Circón	1.92
<i>Crown</i>	1.52		
Flint (de roca)	1.63		

Fuente: [www.itlalaguna.edu.mx/luzamarilla](http://www.itlalaguna.edu.mx/luzamarilla). Consulta: mayo de 2012.

A la atmósfera generalmente se le llama espacio libre, aunque algunas características de ésta provocan que no sea considerada como espacio libre estrictamente, la atmósfera normalmente genera pérdidas en las ondas transmitidas.

Las ondas electromagnéticas se pueden propagar dentro y fuera de la atmósfera, cuando las ondas se propagan dentro de la atmósfera se les puede llamar ondas terrestres u ondas espaciales, este tipo de clasificación es dependiente de las bandas de frecuencias que se está utilizando. Cada banda de frecuencias tiene designada aplicaciones para la que pueden llegar a ser utilizada. A cada una de éstas bandas les corresponden tipos de transmisión distintos. Otro tipo de ondas son las llamadas ondas celestes, éstas se transmiten sobre el nivel del horizonte, con ángulos normalmente grandes con respecto a la tierra, se transmiten hacia el cielo donde son refractadas o reflejadas hacia la superficie terrestre por la ionosfera.

La tabla muestra cómo están divididas las bandas de Radio Frecuencias y sus longitudes de onda.

Tabla II. **División del espectro electromagnético y longitudes de onda**

Frecuencia	Denominación	Longitud de onda
3 – 30 Khz	VLF Frecuencia muy baja	100,000 – 10,000 m
30 – 300 Khz	LF Frecuencia baja	10,000 – 1000 m
300 – 3000 Khz	MF Frecuencia media	1000 - 100 m
3 – 30 Mhz	HF Frecuencia alta	100 – 10 m
30 – 300 Mhz	VHF Frecuencia muy alta	10 – 1 m
300 – 3000 Mhz	UHF Frecuencia Ultra elevada	1 m – 10 cm
3 – 30 Ghz	SHF Frecuencia Superelevada	10 – 1 cm
30 – 300 Ghz	EHF Frecuencia Extremadamente alta	1 cm – 1 mm

Fuente: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/campos\\_v\\_da](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da). p. 3. Consulta: junio de 2012.

Las ondas electromagnéticas se desplazan en el espacio libre como una línea recta. Las ondas a través del llamado espacio libre sufren cambios en su amplitud, su fase y cambios en la polarización de éstas mismas, por aspectos entre los cuales se encuentran el clima, el lugar de la estación terrena, y en el caso más específico el efecto provocado por obstáculos físicos que la señal tiene que atravesar al estar realizando una transmisión en comunicaciones móviles.

Los servicios de telecomunicaciones, radiodifusión, radiolocalización (radar), teledetección, telefonía celular y comunicaciones satelitales móviles

tienen en común el empleo de ondas electromagnéticas radiadas como soporte para la transmisión de información entre el transmisor y el receptor.

Las ondas electromagnéticas se propagan a lo largo de la tierra de diferente manera. Las dos rutas principales por las cuales pueden viajar desde transmisor a receptor son a través de la ionósfera (ondas de cielo) o alrededor de la tierra (ondas de tierra). En el rango de frecuencias de las comunicaciones móviles terrestres predominan las ondas de tierra.

### **1.2.1. Ondas de tierra**

Se denominan ondas de tierra a aquellas viajan cerca de la superficie de la tierra, sin abandonar la tropósfera, por esto, no se ven influenciadas por la ionósfera, se las divide en ondas de superficie y ondas de espacio.

### **1.2.2. Onda de superficie**

En la propagación de las ondas superficiales, la energía se desplaza en contacto con la superficie de la tierra. La atenuación que introduce el contacto con la superficie se incrementa rápidamente al aumentar la frecuencia, por ello sólo pueden utilizarse para frecuencias inferiores a 30 MHz. Son muy poco utilizadas.

### **1.2.3. Ondas de espacio**

Este es el modo de propagación de las ondas en las comunicaciones móviles terrestres. Las ondas espaciales viajan cercanas a la superficie de la tierra no más de 15 km o en la troposfera.



El primer tipo de onda de espacio, la onda directa, viaja directamente del transmisor al receptor sin ningún tipo de reflexiones.

El segundo tipo, la onda reflejada, llega a la antena receptora luego de reflejarse una o varias veces en la superficie de la tierra o en cualquier tipo de objetos. La onda reflejada difiere en fase y amplitud respecto a la onda directa debido a la diferencia de caminos recorridos, al llegar al receptor dependiendo de la fase relativa podrían sumarse o anularse.

El tercer tipo de onda de espacio es la onda reflejada troposféricamente, estas ondas viajan en la capa de la atmósfera denominada tropósfera comprendida entre los 300 y 10.000 mts de altura. Las condiciones de propagación de estas ondas presentan gran dependencia con la temperatura y la humedad en la tropósfera.

#### **1.2.4. Ondas de cielo**

La onda es refractada en la ionósfera. Esto tiene sus complicaciones debido a que los rayos ultravioletas ionizan la ionósfera cambiando sus características entre el día y la noche. Son de gran uso para comunicaciones a gran distancia.

### **1.3. Mecanismos de propagación de las ondas electromagnéticas**

Las ecuaciones de Maxwell describen el movimiento de una onda electromagnética cambiante en el tiempo y en el espacio. Este modelo matemático supone la radiación de las ondas desde una fuente puntual en forma radial, propagándose en todas direcciones en línea recta, llenando por completo el volumen esférico formado por el radio de propagación, decreciendo

su magnitud en forma inversa proporcional al cuadrado de la distancia hacia la fuente puntual.

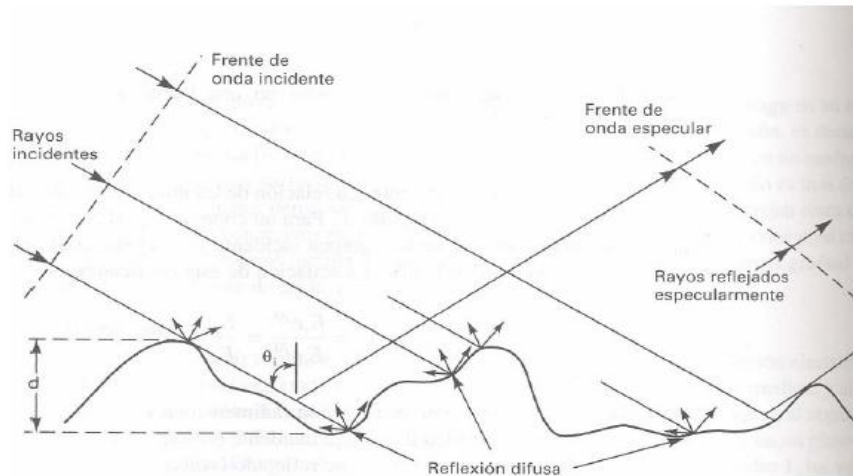
La propagación de las ondas en el mundo real es un tanto distinta ya que toda onda que se propaga en el espacio no es ajena al medio que la rodea, es decir, la onda interactúa con su entorno, creando múltiples trayectorias por medio de las cuales la onda alcanza su objetivo.

Los fenómenos en los cuales la onda interactúa con su medio se conoce como mecanismos de propagación; son muchos los factores que influyen para que estos fenómenos se den: frecuencia de transmisión, directividad de las antenas, distancia de las antenas hacia la tierra y la estructura que conforma el ambiente en el cual la onda se propaga, entre otros. Los principales mecanismos de propagación son la Reflexión, la Difracción, Refracción y la Dispersión.

### **1.3.1. Reflexión**

Cuando una onda incide sobre la superficie de separación entre dos medios diferentes, una parte de su energía se transmite al segundo medio en forma de una onda transmitida de características similares al incidente, mientras que otra parte de la energía incidente rebota en dicha superficie y se propaga hacia atrás, al primer medio, para constituir una onda reflejada. Este fenómeno de reflexión y transmisión de perturbaciones oscilatorias es común tanto a las ondas mecánicas como a la luz y otras ondas electromagnéticas.

Figura 1. Reflexión



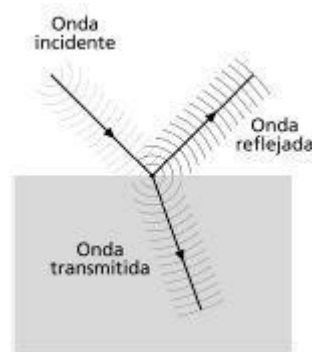
Fuente: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/vila\\_b\\_ca](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca). p.18. Consulta: junio de 2012.

Las frecuencias de las ondas incidente, transmitida y reflejada son iguales, en cambio, la longitud de onda de la onda transmitida  $\lambda_T$  difiere de la incidente  $\lambda_I$  en una relación que depende de sus índices de refracción respectivos:

$$\frac{\lambda_T}{\lambda_I} = \frac{n_I}{n_T} \quad 1.2$$

La fracción de energía del haz que se transmite al segundo medio depende del tipo de superficie de separación, de la dirección de incidencia sobre la misma, del campo eléctrico asociado al haz y de los índices de refracción de los dos medios. Así, en el paso del aire al vidrio se transmite aproximadamente un 96% de la energía incidente, mientras que cuando el segundo medio tiene una superficie de separación pulida y reflectante (por ejemplo, un espejo), se refleja prácticamente toda la energía y apenas existe transmisión.

Figura 2. **Reflexión de una onda**



Fuente: [www.blog.sounddefine.com](http://www.blog.sounddefine.com). Consulta: junio de 2012.

Una onda que llega a la frontera entre dos medios en parte se refleja al primer medio y en parte se transmite al segundo (normalmente refractada, con otra dirección de propagación).

### **1.3.1.1. Leyes de la reflexión**

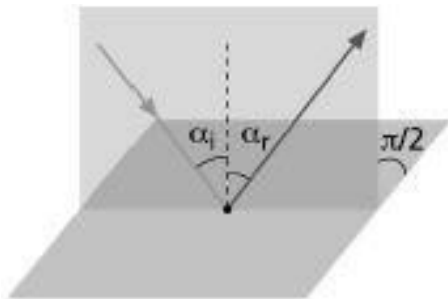
La reflexión de ondas electromagnéticas en la superficie de separación entre dos medios se puede definir dos leyes básicas:

- Cada rayo de la onda incidente y el rayo correspondiente de la onda reflejada están contenidos en un mismo plano, que es perpendicular a la superficie de separación entre los dos medios en el punto de incidencia.
- El ángulo que forman el rayo incidente y el rayo reflejado con la recta perpendicular a la frontera son iguales. Estos ángulos se conocen, respectivamente, como ángulo de incidencia y ángulo de reflexión. Es decir:

$$\alpha_i = \alpha_r$$

1.3

Figura 3. **Ángulos formados con la recta perpendicular para el rayo incidente y reflejado**



Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). Consulta: junio de 2012.

Los rayos incidente y reflejado se encuentran en el mismo plano, que es perpendicular al de incidencia, y forman un mismo ángulo con la normal en el punto de incidencia.

### 1.3.2. Difracción

Es un fenómeno característico de las ondas, éste se basa en el curvado y esparcido de las ondas cuando encuentran un obstáculo o al atravesar una rendija. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio. También sucede cuando un grupo de ondas de tamaño finito se propaga; por ejemplo, por causa de la difracción, un haz angosto de ondas de luz de un láser, debe finalmente divergir en un rayo más amplio a una cierta distancia del emisor.

El fenómeno de la difracción es un fenómeno de tipo interferencial y como tal requiere la superposición de ondas coherentes entre sí.

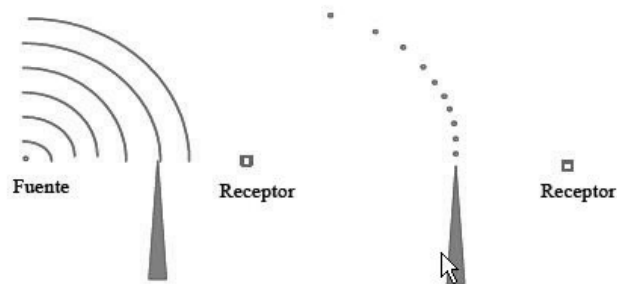
Se produce cuando la longitud de onda es mayor que las dimensiones del objeto, por tanto, los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que el tamaño del objeto aumenta comparado con la longitud de onda.

En el espectro electromagnético los rayos X tienen longitudes de onda similares a las distancias interatómicas en la materia. Es posible por lo tanto utilizar la difracción de rayos X como un método para explorar la naturaleza de la estructura cristalina.

Debido a la dualidad onda-corpúsculo característica de la mecánica cuántica es posible observar la difracción de partículas como neutrones o electrones. En los inicios de la mecánica cuántica este fue uno de los argumentos más claros a favor de la descripción ondulatoria que realiza la mecánica cuántica de las partículas subatómicas.

La explicación de este fenómeno proviene de la Teoría Ondulatoria que Christian Huygens desarrollo en el siglo XVII para la luz. Según el principio de Huygens, cada punto del espacio que es atravesado por una onda puede ser considerado una fuente puntual de ondas de sí mismo.

Figura 4. **Principio de Huygens**



Fuente: [www.fisicaoptica501.blogspot.com](http://www.fisicaoptica501.blogspot.com). Consulta: junio de 2012.

Quando existe un obstáculo en el camino de las ondas electromagnéticas la difracción (el esparcimiento de las ondas en los límites de la superficie) permite que un pequeño porcentaje de las ondas llegue del otro lado de la obstrucción. Este fenómeno generalmente permite la recepción en zonas de sombra de señal detrás de montañas o grandes edificaciones.

### 1.3.2.1. **Principio de Huygens**

Aproximadamente en 1860 el físico danés Huygens propuso un mecanismo sencillo para trazar la propagación de ondas. Su construcción es aplicable a ondas mecánicas en un medio material.

Un frente de onda es una superficie que pasa por todos los puntos del medio alcanzados por el movimiento ondulatorio en el mismo momento. Se puede trazar una serie de líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda, las cuales se denominan rayos y corresponden a las líneas de propagación de la onda.

Así, la relación entre rayos y frente de ondas es similar a la de líneas de fuerza y superficies equipotenciales (con el mismo potencial o voltaje).

De hecho, según el teorema de Malus, el tiempo que separa puntos correspondientes de dos superficies de onda es el mismo para todos los pares de puntos correspondientes.

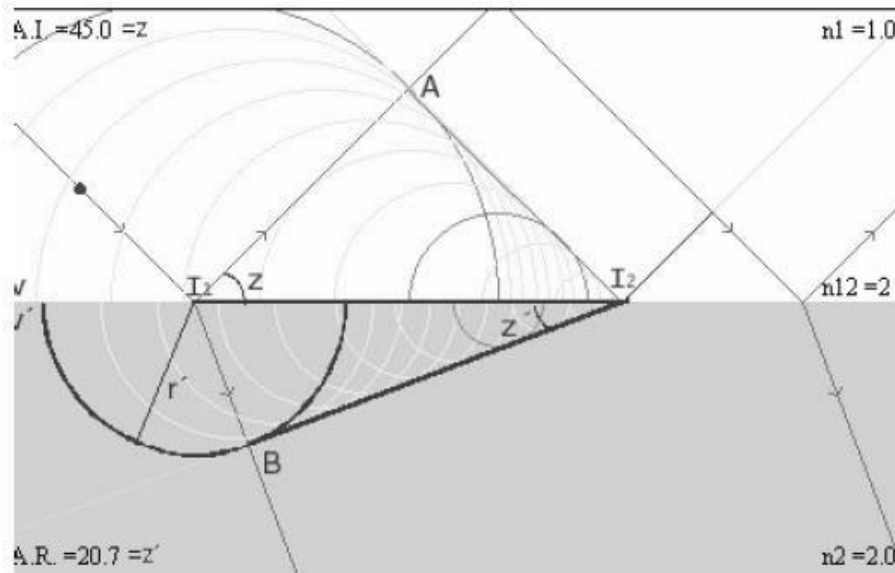
Huygens visualizo un método para pasar de un frente de onda a otro. Cuando el movimiento ondulatorio alcanza los puntos que componen un frente de onda, cada partícula del frente se convierte en una fuente secundaria de onda, que emite onda secundaria (indicada por semicircunferencias) que alcanzan la próxima capa de partículas del medio.

Entonces estas partículas se ponen en movimiento, formando el subsiguiente frente de onda con la envolvente de estas semicircunferencias. El proceso se repite, resultando la propagación de la onda a través del medio.

Esta representación de la propagación es muy razonable cuando la onda resulta de las vibraciones mecánicas de las partículas del medio, es decir una onda elástica pero no tendría significado físico en las ondas electromagnéticas donde no hay partículas que vibren.



Figura 5. Principio de Huygens, demostración de la Ley de Refracción



Fuente: [www.acacia.pntic.mec.es](http://www.acacia.pntic.mec.es). Consulta: junio de 2012.

A partir del principio de Huygens, puede demostrarse la ley de la refracción. Si se supone que un frente de onda avanza hacia la superficie refractante  $l_1l_2$  que separa dos medios en los cuales la velocidad de la luz es  $v$  y  $v'$ . Si se considera a  $l_1$  como emisor en el tiempo  $\Delta t$  que la perturbación llega de A a  $l_2$ , la perturbación original en  $l_1$  habrá alcanzado la esfera de radio  $r' = v' * \Delta t$ . En el mismo tiempo la perturbación correspondiente llega a todos los puntos de la envolvente  $B l_2$ , y toma los rayos normales a los frentes de onda, de la figura se deduce que:

$$\frac{Al_1}{l_1B} = \frac{\sin z}{\sin z'} = \frac{v * \Delta t}{v' * \Delta t} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1.5)$$

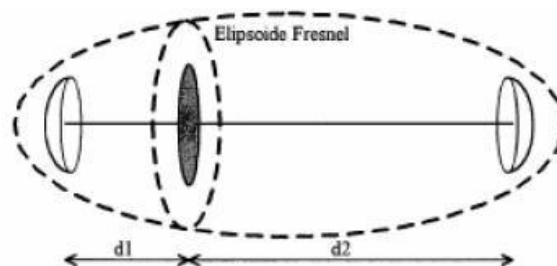
$$p * n_1 * \sin \alpha_i = n_2 * \sin \alpha_r \quad (1.6)$$

Lo cual está de acuerdo no solo a la experiencia no sólo en cuanto a direcciones de propagación sino también en que en el medio de mayor índice de refracción la velocidad es menor contrariamente a lo que suponían Descartes y Newton.

### 1.3.2.2. Fresnel

De acuerdo con el principio de Huygens, cada elemento del frente de onda produce un frente de onda secundario, teniendo en la antena receptora infinidad de frentes de onda incidiendo los cuales se suman o resta de acuerdo a su fase relativa (función de la diferencia de caminos recorridos). El efecto queda determinado por una familia de elipsoides alrededor del rayo directo denominadas elipsoides de Fresnel

Figura 6. **Elipsoides de Fresnel**



Fuente: [www.radiopropagacionuft.wordpress.com](http://www.radiopropagacionuft.wordpress.com). Consulta: junio de 2012.

En la figura 6 se ve la conformación de las zonas de Fresnel. Los radios de dichas zonas se pueden calcular como:

$$F_n = \frac{\sqrt{n\lambda d_1 d_2}}{d} \quad (1.7)$$

Cabe destacar que las zonas pares suman destructivamente a la señal y que la primera zona de Fresnel transporta más de la mitad de la energía total. La atenuación producida por un obstáculo puede ser calculada en función del despeje de la primera zona de Fresnel:

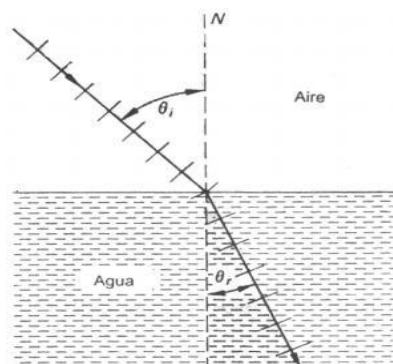
$$A_t = 10 + 20 * \log \frac{D}{F_1} \quad (1.8)$$

Donde  $A_t$  es la atenuación por obstáculo expresada en dB.

### 1.3.3. Refracción

Las ondas electromagnéticas se propagan en línea recta a velocidad constante en un medio uniforme. Si cambia el medio, la velocidad cambiará también y la onda electromagnética viajará en línea recta a lo largo de una nueva trayectoria. La desviación de una onda electromagnética cuando pasa oblicuamente de un medio a otro se conoce como refracción.

Figura 7. **Refracción de un frente de onda en la frontera entre dos medios**



Fuente: [www.fenomenosdulatorios.blogspot.com](http://www.fenomenosdulatorios.blogspot.com). Consulta junio de 2012.

Para el caso de una onda electromagnética que se propaga del aire al agua. El ángulo  $\theta_i$  que se forma entre el haz incidente y la normal a la superficie se conoce como ángulo de incidencia. Al ángulo  $\theta_r$  formado entre el haz refractado y la normal se le llama ángulo de refracción

### 1.3.3.1. Leyes de Refracción

Desde la antigüedad se conocen y se aplican dos leyes básicas de refracción. Estas leyes se enuncian como sigue:

- El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.
- La trayectoria de un rayo refractado en la interfase entre dos medios es exactamente reversible.

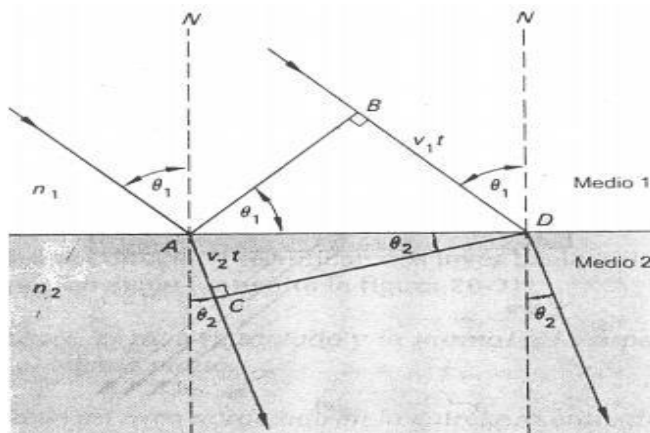
Estas dos leyes se demuestran fácilmente mediante la observación y la experimentación. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, es mucho más importante entender y predecir el grado de flexión que ocurre.

El cambio en la dirección de una onda electromagnética al entrar en otro medio se puede analizar con la ayuda de un diagrama de frente de onda como el de la figura 5. Una onda plana en un medio de índice de refracción  $n_1$  choca con la superficie plana de un medio cuyo índice de refracción es  $n_2$ . El ángulo de incidencia se designa como  $\theta_1$  y el ángulo de refracción se representa con  $\theta_2$ . En la figura se supone que el segundo medio tiene una densidad mayor que el primero  $n_2 > n_1$ . La línea AB representa el frente de onda en un tiempo  $t = 0$ , justamente cuando entra en contacto con el medio 2.

La línea CD representa el mismo frente de onda después del tiempo  $t$  requerido para entrar totalmente al segundo medio. El rayo se desplaza de B a D en el medio 1 en el mismo tiempo  $t$  requerido para que el rayo viaje de A a C en el medio 2. Suponiendo que la velocidad  $v_2$  en el segundo medio es menor que velocidad  $v_1$  en el primer medio, la distancia AC será menor que la distancia BD. Estas longitudes están dadas por:

$$AC = v_2 * t \quad BD = v_1 * t \quad (1.9)$$

Figura 8. Demostración de la Ley de Snell



Fuente: [www.sc.ehu.es](http://www.sc.ehu.es). Consulta: junio de 2012.

Se puede demostrar por geometría que el ángulo BAV es igual a  $\theta_1$  y que el ángulo AVC es igual a  $\theta_2$ , como se indica en la figura 8. La línea AD forma una hipotenusa que es común a los dos triángulos AVB y AVC. Partiendo de la figura se tiene:

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 * t}{AD} \quad 1.10$$

$$\sin \theta_2 = \frac{v_2 * t}{AD} \quad 1.11$$

Dividiendo la ecuación 1.10 entre la ecuación 1.11 se obtiene:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad 1.12$$

La razón del seno del ángulo de incidencia con respecto al seno del ángulo de refracción es igual a la razón de la velocidad de la luz en el medio incidente con respecto a la velocidad de la luz en el medio de refracción.

Esta regla fue descubierta por el astrónomo danés Willebrord Snell en el siglo XVII, y se llama en su honor ley de Snell. Una forma alternativa para esta ley puede obtenerse expresando las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  en términos de los índices de refracción de los dos medios. De las ecuaciones 1.10 y 1.11 respectivamente

$$v_1 = \frac{c}{\eta_1} \quad 1.13$$

$$v_2 = \frac{c}{\eta_2} \quad 1.14$$

Utilizando estas ecuaciones en la ecuación de la Ley de Snell, se tiene:

$$\eta_1 * \sin \theta_1 = \eta_2 * \sin \theta_2 \quad 1.15$$

Puesto que el seno de un ángulo aumenta al aumentar el ángulo, se observa que un incremento en el índice de refracción provoca una disminución en el ángulo y viceversa.

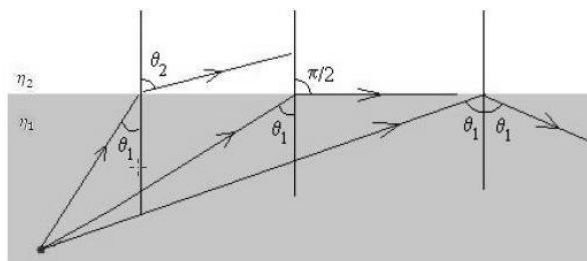
### 1.3.3.2. Reflexión total y ángulo límite

Según se desprende de la Ley de Snell, cuando un haz luminoso pasa de un medio a otro, se acerca a la normal si el índice de refracción del segundo medio es mayor que el del primero, y se aleja de ella en caso contrario. Así, si  $\eta_1 > \eta_2$ , es posible incrementar progresivamente el ángulo de incidencia hasta que se obtenga un ángulo de refracción igual a  $90^\circ$ . Entonces, la Ley de Snell se puede expresar como:

$$\sin \alpha_L = \frac{\eta_2}{\eta_1} < 1 \quad 1.16$$

Donde  $\alpha_L$  es el ángulo de incidencia, en este caso llamado ángulo límite, para el que el ángulo de refracción es  $90^\circ$ . Por encima del ángulo límite, toda la energía del haz luminoso incidente se refleja en un fenómeno conocido como reflexión total. Este efecto se emplea en diversos dispositivos prácticos, como los prismáticos binoculares, aunque alcanza una utilidad particularmente interesante en el caso de la fibra óptica.

Figura 9. Reflexión total y ángulo límite



Fuente: [www.fisic.jimdo.com](http://www.fisic.jimdo.com). Consulta: junio de 2012.

#### **1.3.4. Dispersión**

La permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética de un medio diferente del vacío dependen, además de la naturaleza del medio, de la longitud de onda de la radiación. De esto se desprende que la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en un medio depende también de la longitud de onda de dicha radiación. Por tanto, la desviación de un rayo de luz al cambiar de medio será diferente para cada color (para cada longitud de onda). El ejemplo más claro es el de un haz de luz blanca que se descompone en colores al pasar por un prisma. La luz blanca es realmente la suma de haces de luz de distintas longitudes de onda, que son desviadas de manera diferente. Este fenómeno se llama dispersión. Es el causante de la aberración cromática, el halo de colores que se puede apreciar alrededor de los objetos al observarlos con instrumentos que utilizan lentes como prismáticos o telescopios.

#### **1.4. Ecuación de onda**

Las ecuaciones de Maxwell se publicaron en 1864, su principal función es predecir la propagación de la energía en formas de onda.

Las ecuaciones que nos dicen la forma de propagación de los campos electromagnéticos consideran que los medios son lineales, isotrópicos y homogéneos. Cuando se considera un medio lineal se refiere a que la permitividad no depende de la magnitud o nivel del campo eléctrico, y la permeabilidad no depende de la magnitud ni el nivel del campo magnético. Isotrópico se refiere a que la densidad de flujo eléctrico es paralela al campo eléctrico y a la densidad del flujo magnético.



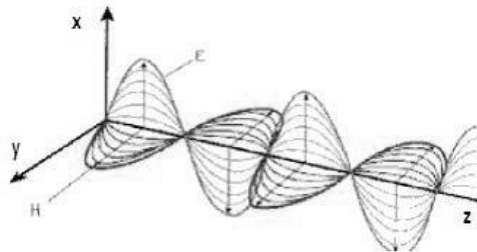
Las ecuaciones de onda electromagnéticas son necesarias para describir la propagación de las ondas electromagnéticas, tanto en presencia de materia como en el vacío.

Al considerar una onda electromagnética, se tiene un campo eléctrico  $E$  cambiante el cual produce un campo magnético  $H$  también cambiante, este campo  $H$ , a su vez genera un campo eléctrico que continuara el proceso descrito, produciendo la propagación de la energía, la cual es utilizada por medio de la técnica de modulación para transmitir información.

Las ondas electromagnéticas que viajan en el espacio se propagan en forma transversal, es decir, tanto el campo eléctrico como el magnético son enteramente transversales a la dirección de la propagación. No existe componente de  $H$  ni de  $E$  en la dirección de la transmisión.

Una onda en el espacio es una muestra de la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético. Como se mencionó, en tal onda, el campo magnético que cambia con el tiempo puede considerarse como generador de un campo eléctrico que varía con el tiempo, que a su vez genera un campo magnético y en la medida que el proceso se repite, la energía se propaga a través del espacio vacío. Las direcciones de  $H$  y  $E$  son en todo momento perpendiculares una respecto de la otra.

Figura 10. **Campo eléctrico y magnético propagándose**



Fuente: JOHNS, Carl. Teoría Electromagnética, Campos y Ondas. p. 136.

Como se observa en la figura 1.11, el campo eléctrico tiene su amplitud  $E_x$  en la dirección  $x$  y el campo magnético tiene su amplitud  $H$  en la dirección  $y$ , y todo esto se propaga en dirección del eje  $z$ , que en este caso es la distancia.

Con el objeto de generar una expresión matemática para la ecuación de onda, se establece para un medio no conductor como el espacio libre, una densidad de corriente de conducción  $J$  igual a cero. Por lo tanto, la ecuación de Maxwell deducida de la Ley de Ampere se reduce a la expresión:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad 1.17$$

Esta ecuación 1.17 al ser representada en coordenadas rectangulares se tiene:

$$a_x \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - a_y \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} + a_z \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial t} a_x D_x + a_y D_y + a_z D_z \quad 1.18$$

Para una onda plana que viaja en dirección  $z$ , las únicas componentes de la ecuación 1.19 que contribuyen en la propagación son:

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} a_x = \frac{\partial D_x}{\partial t} a_x \quad 1.19$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad 1.20$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del espacio libre con valor de  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} * 10^{-9} \text{ F m} .$

Utilizando la ecuación de maxwell generada a partir de la Ley de Faraday

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad 1.21$$

La ecuación 1.21 al ser representada en coordenadas rectangulares se tiene

$$a_x \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} - a_y \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} + a_z \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial t} a_x B_x + a_y B_y + a_z B_z \quad 1.22$$

Para una onda plana que viaja en dirección z, las únicas componentes de la ecuación 1.22 que contribuyen en la propagación son

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} a_y = -\frac{\partial B_y}{\partial t} a_y \quad 1.23$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad 1.24$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del espacio libre con valor de  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H m} .$

Las expresiones 1.20 constituyen la relación directa entre la derivada espacial de  $H_y$  con la derivada del tiempo de  $E_y$ , mientras que 1.24 relaciona la derivada espacial de  $E_y$  con la derivada respecto al tiempo de  $H_y$ .

Al obtener el diferencial de 1.20 respecto al tiempo  $t$  y el diferencial de 1.24 respecto a la coordenada espacial  $z$ , se puede eliminar  $H_y$  y obtenerse una expresión para  $E_y$  en términos de  $t$  y  $z$ . Llevando a cabo este proceso, se obtiene a partir de 1.20

$$\partial \frac{\partial H_y}{\partial z} \partial t = -\epsilon_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad 1.25$$

Y de la ecuación 1.24, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -\mu_0 \partial \frac{\partial H_y}{\partial t} \partial z \quad 1.26$$

Dividiendo 1.26 entre  $-\mu_0$  se obtiene:

$$- \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \partial \frac{\partial H_y}{\partial t} \partial z \quad 1.27$$

Rescribiendo la ecuación 1.25 se tiene:

$$\partial \frac{\partial H_y}{\partial z} \partial z = -\epsilon_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad 1.28$$

Al comparar la ecuación 1.27 y 1.28, se puede reducir la expresión:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \quad 1.29$$

Esta ecuación relaciona la variación en el tiempo y en el espacio de la magnitud escalar  $E_x$  de la intensidad de campo eléctrico y se conoce como ecuación de onda de  $E_x$ .

Si se obtiene las derivadas parcial espacial de  $z$  para 1.20 y respecto al tiempo  $t$  para 1.24, puede eliminarse  $E_x$  y obtenerse una ecuación para  $H_y$  como sigue

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} \quad 1.30$$

Son estas respectivamente, las ecuaciones para los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética plana que se propaga en la dirección  $z$ , y representan además la forma más general de describir el movimiento de estos campos en función del tiempo y del espacio.

Ahora al escribir la ecuación 1.29 en forma fasorial, se tiene

$$-\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \quad 1.31$$

Esta ecuación diferencial puede ser resuelta inicialmente con la solución

$$E_x = E_{x_0} * e^{-j\omega z} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad 1.32$$

Si se incluye en la ecuación 1.32 el factor  $e^{j\omega t}$ , y se reduce esta expresión a su forma trigonométrica al tomar la parte real de dicha ecuación se tiene

$$E_x = E_{x_0} * \cos \omega t - z \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad 1.33$$

El cual posee un campo  $H_y$  asociado

$$H_y = - \frac{1}{j\omega\mu_0} * E_{x_0} * -j\omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0} * e^{-j\omega z} \sqrt{\mu_0\epsilon_0} \quad 1.34$$

Y en forma trigonométrica,

$$H_y = E_{x_0} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} * \cos \omega t - z \sqrt{\mu_0\epsilon_0} \quad 1.35$$

Se determina, entonces, que estos campos viajan en forma perpendicular uno respecto al otro, relacionados directamente por la constante  $\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ .

Esta constante define directamente la velocidad de las ondas electromagnéticas en el espacio libre,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 299,792,458 \text{ m/s} \quad 1.36$$

Que es igual a la velocidad de la luz  $c$ , estableciendo que las ondas se propagan en el espacio libre a la velocidad de la luz.

Esta constante posee además una importancia partícula, ya que su inverso define la impedancia intrínseca del medio  $\eta$  eta, donde  $\eta$  tiene dimensionales de Ohms  $\Omega$ . La impedancia intrínseca del espacio libre queda definida por:

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 120\pi \Omega \quad 1.37$$

Aunque no puede existir físicamente una onda plana uniforme porque se extendería al infinito en dos dimensiones por lo menos, y representaría una

cantidad infinita de energía, el campo distante de una antena de transmisión es esencialmente una onda plana uniforme en una región limitada.

Se ha considerado solamente una onda que varía sinusoidalmente con el tiempo en el espacio, sin embargo, puede hacerse una combinación apropiada de soluciones a la ecuación de la onda para lograr una onda de cualquier forma deseada. La suma de un número infinito de armónicas por medio del uso de las series de Fourier puede producir una onda periódica de forma cuadrada o triangular tanto en el espacio como en el tiempo. Puede obtenerse ondas no periódicas a partir de la solución básica por el método de la Transformada de Fourier.

### **1.5. Potencia de una onda electromagnética**

Es posible transportar energía a través del espacio vacío mediante las ondas electromagnéticas. La potencia de una onda electromagnética se relaciona directamente con el concepto del vector de Poynting.

Considérese un área de ancho  $r$  (en la dirección del eje  $x$ ) y altura  $u$  (en dirección del eje  $y$ ): una onda electromagnética con dirección  $z$  incide sobre el plano en forma normal (sobre el eje de su dirección) incide con polarización vertical, la onda producirá una tensión  $uE$  y una corriente  $rH$  sobre la superficie. La potencia entregada viene dada por la expresión

$$p = V * I \quad 1.38$$

Al sustituir en 1.38 las componentes de campo, se tiene

$$p = EH * ur \quad 1.39$$

Esta última expresión posee el término  $ur$ , que puede ser sustituido por  $A$ . Donde  $A$  es el área de la superficie. La densidad de potencia es entonces

$$S = \frac{P}{A} = EH \quad 1.40$$

Con unidades  $\frac{W}{m^2}$  esta última expresión puede, denotarse en notación vectorial como

$$S = E_x \times H_y \quad 1.41$$

Determinando esto que  $S$  es perpendicular tanto a  $E_x$  como a  $H_y$ , viajando en la dirección de  $z$ .  $S$  Es una densidad superficial de potencia llamada el vector instantáneo de Poynting. El vector promedio de poynting se obtienen integrando el vector instantáneo durante un periodo y dividiendo entre un periodo o por notación compleja por la expresión

$$S_{pr} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} E \times H^* = \frac{1}{2} E_x H_y \cos \phi \quad 1.42$$

Donde  $S_{pr}$  es el vector promedio de poynting en la dirección  $z$ ,  $\phi$  es el ángulo de fase en el tiempo entre  $E_x$  y  $H_y$ ,

$$E = a_x E_x = a_x E_x e^{-j\omega t} \quad 1.43$$

$$H^* = a_y H_y = a_y H_y e^{-j\omega t - \phi} \quad 1.44$$

Donde  $E$  viene dado en voltio/metro y  $H^*$  (definido como el conjugado de  $H$ , ambos con igual dirección espacial pero con diferente signo en sus factores de fase) en amperio/metro.



## 1.6. Penetración de las ondas electromagnéticas

La penetración de las ondas electromagnéticas es definida como la atenuación que estas sufren en el momento de pasar de un espacio libre hacia el interior de una construcción debiéndose esta atenuación es su mayoría al material con que el edificio está construido, su altura, numero de ventanas y frecuencia utilizada, entre otras, limitando esto, el desempeño de un sistema de comunicaciones en el interior de una estructura.

Este fenómeno no es el mismo para todos los ambientes siendo importante notar las distintas características de cada uno de ellos, se mencionara como ejemplo de esto, el hecho de que se ha mantenido distintos niveles de atenuación entre los disto niveles de un mismo edificio.

Una onda electromagnética, la cual viaja en el espacio libre, utiliza los mecanismos de propagación antes descritos para penetrar al interior de una construcción, siendo en este caso, las paredes y los distintos materiales de construcción, los medios sobre cuyas fronteras, las ondas inciden.

Por lo anterior razón, son de suma importancia los distintos coeficientes de reflexión y refracción. Una pared constituye una caso particular de dichos fenómenos, donde una onda pasara del medio uno, en este caso el aire a un medio dos, constituido en este caso por las paredes, cuyas características dieléctricas vendrán dadas por el material de construcción, viajando a través de él, siendo afectada por una constante de atenuación  $\alpha$  cuyas dimensionales son  $d\beta$  cm, para finalmente pasar a un medio con características dieléctricas similares a las del medio uno. La constante de atenuación vendrá dada por la expresión.

$$\alpha = \frac{1}{2} \omega \tan \delta \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \quad 1.45$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de operación,  $\epsilon_r$  es su permitividad relativa y  $\tan \delta$  es la tangente de pérdida del material definida como

$$\tan \delta = 2\sigma / \epsilon \omega \quad 1.46$$

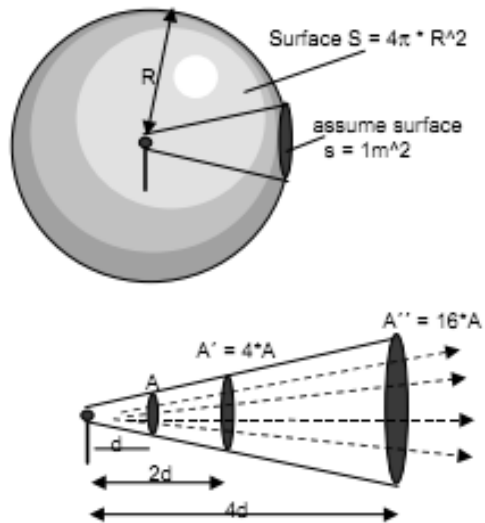
Donde  $\sigma$  es la conductividad,  $\epsilon$  es la constante dieléctrica y  $\omega$  es la frecuencia de operación.

### 1.6.1. Atenuación

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso, la cual nos dice que entre más lejos va el frente de onda de la antena transmisora, la densidad de potencia es más pequeña. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. En consecuencia la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, si no que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que hace que la pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

Figura 11. Pérdidas en el espacio libre



Fuente: [www.montevideolibre.org](http://www.montevideolibre.org), capítulo 4.2. Consulta: junio de 2012.

Las señales radio se atenúan, en el mejor de los casos, en proporción al cuadrado de la distancia (desde la antena). Esto es simplemente una ley física, válida para todas las bandas de frecuencia y todo tipo de modulación. En comunicaciones móviles, los niveles de señal disminuyen proporcionalmente a la distancia elevada al cubo o al cuadrado, dependiendo del terreno. La atenuación de la señal se expresa, normalmente, en  $d\beta$  por década o en  $d\beta$  por octavo (significa el doble de distancia). Una década tiene 3.32 octavos.

En comunicaciones móviles la distancia se recorre una sola vez, pero el trayecto de la propagación no es en el espacio libre, sino que es fuertemente bloqueado en la mayoría de los casos, causando pérdidas considerables. Los niveles de señal recibida son inversamente proporcionales a la distancia elevada del cuadrado a la quinta, dependiendo del entorno entre transmisor y receptor.

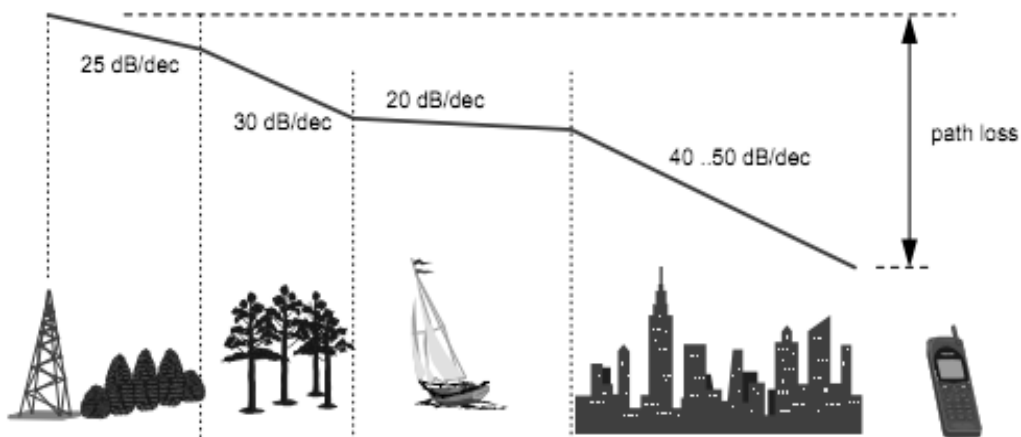
### 1.6.2. Pérdidas básicas en propagación de ondas electromagnéticas

Las pérdidas en radiopropagación normalmente son calculadas en escala logarítmica, en  $\text{dB}$ . Las pérdidas tienen una relación exponencial con la distancia.

Las fórmulas de pérdida de propagación están basadas en la fórmula de pérdidas en el espacio libre con un factor adicional de corrección empírica.

Los niveles de pérdida de la señal son distintos en diferentes entornos (es lo que se conoce como (tipos de uso de la tierra). Pérdidas típicas de la señal varían entre 20 y 45  $\text{dB}/\text{década}$ .

Figura 12. Niveles de atenuación en diferentes entornos



Fuente: <http://prezi.com/gv6iumlo8x2e/perdidas-basicas-de-propagacion>. Consulta: julio de 2012.

Las pérdidas de la señal de radio dependen del entorno que la señal tenga que atravesar. Se puede observar un aumento en la potencia de la señal a pesar del incremento de la distancia, cuando el receptor vuelve a una zona abierta después de atravesar un entorno urbano, causando un gran exponente de atenuación. Desde ese momento la potencia recibida depende del entorno cercano al receptor. No se produce un aumento abrupto de la potencia sino un incremento gradual, como si el móvil entrase en un área abierta.



## 2. MODELOS DE PROPAGACIÓN

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi empíricos).

Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor sea móvil o fijo. La ventaja de modelar radio canales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor ( $Tx$ ) y Receptor ( $Rx$ ), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos (especificaciones técnicas).

El desempeño de los modelos de propagación se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas de campo reales. La aplicabilidad de un modelo depende de las especificaciones que este mismo requiera tal como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado o cuasi liso), las características del ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta), características de la atmósfera (índice de refracción, intensidad de las lluvias),

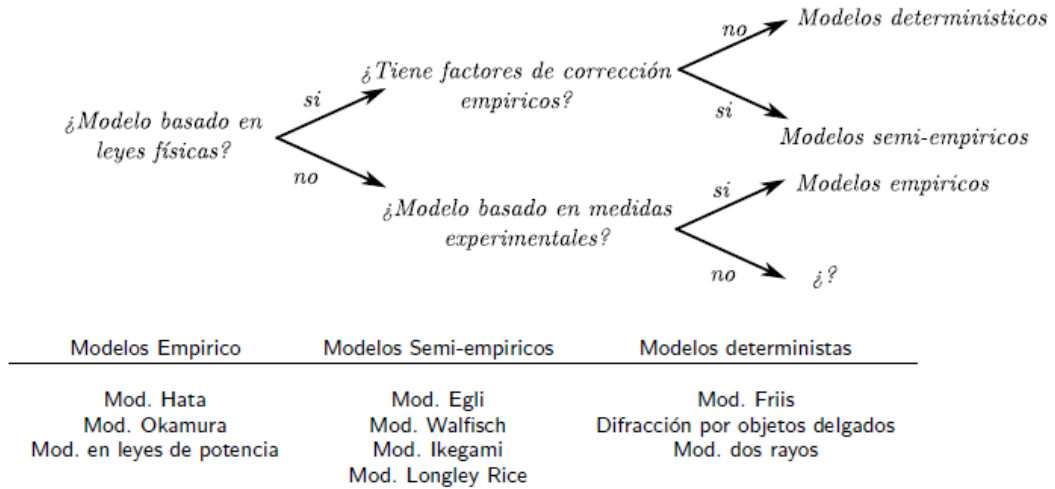
propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre), tipo del material de las construcciones urbanas etc.

Un modelo de propagación predice el valor medio de señal o las pérdidas de trayectoria entre un transmisor y un receptor en función de la distancia. Hay cantidad de factores que afectan la medida de las pérdidas en el trayecto: perfil del terreno, presencia de obstáculos, altura de antena de transmisor y receptor, frecuencia de operación, etc.

Los modelos determinísticos corresponden a una descripción exacta de las causas de pérdida y multicamino. Presentan una gran exactitud pero debido a la gran complejidad de la descripción exacta del medioambiente son muy poco utilizados, únicamente podrían usarse para casos con muy pocas trayectorias múltiples (no más de 3 o 4). Los modelos estocásticos corresponden a un modelo estadístico del entorno, siendo los más apropiados para situaciones reales donde la cantidad de trayectos múltiples es muy elevada y sería imposible resolverla de manera determinísticos. Por último los modelos híbridos son una combinación de los dos anteriores. Por ejemplo, un modelo estocástico es Okumura-Hata, Walfisch-Ikegami es un modelo híbrido y el de espacio libre es determinístico.



Figura 13. **Clasificación de los modelos de propagación**



Fuente: elaboración propia, con programa HyperSnap 6.

## 2.1. Modelos de propagación en ambientes abiertos

Las técnicas de ingeniería utilizadas en los sistemas de telecomunicación están condicionadas por las condiciones imperantes en el medio de transmisión utilizado. En los sistemas de comunicaciones móviles el principal medio de transmisión son las ondas radioeléctricas, y por lo tanto es fundamental el estudio del comportamiento de los niveles de señal y los fenómenos que intervienen.

Dichas ondas se comportan según el modelo establecido por las leyes de Maxwell. La aplicación de las ecuaciones que describen la teoría electromagnética, que nos proporcionaría de forma exacta las magnitudes (intensidad de campo electromagnético, potencia recibida, niveles de tensión o niveles de corriente), necesitaría de un conocimiento exacto de las condiciones

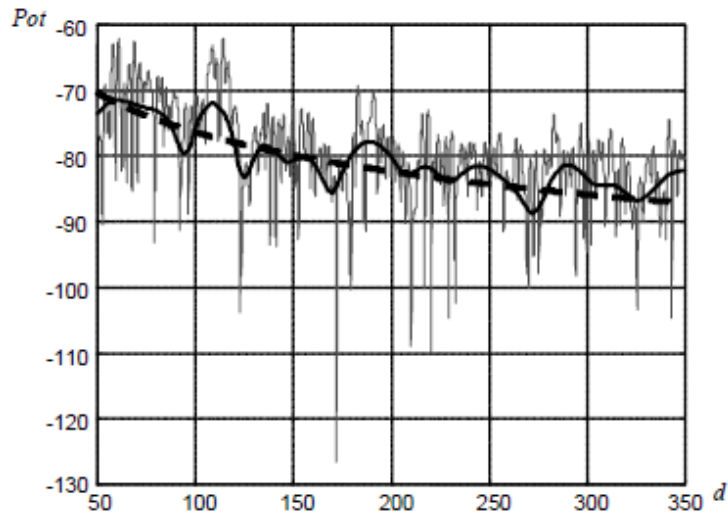
de contorno (posición, forma y composición de todos los objetos situados en el campo de acción de las ondas para todo instante de tiempo).

Este conocimiento es materialmente imposible y, aunque se tuviera, las ecuaciones resultantes sólo serían resolubles mediante complejas técnicas de simulación iterativa, por lo que debe buscarse una caracterización alternativa: suficientemente precisa como para proporcionar una buena estimación de la realidad y a la vez suficientemente sencilla como para que su tratamiento matemático sea práctico.

El estudio empírico ha proporcionado una serie de modelos más o menos complejos que describen el comportamiento de las magnitudes necesarias para describir el medio de transmisión y poder aplicar las técnicas necesarias para una transmisión fiable de la información. Los mecanismos que determinan la propagación de las ondas electromagnéticas y los niveles de señal recibidos dependen de la longitud de onda, objetos interpuestos entre el emisor y receptor, objetos en los que puedan rebotar las ondas, tamaño y composición de los objetos, etc.

Si se monitorea el nivel de potencia recibido en un terminal móvil que se aleja de la antena transmisora se puede observar una variación similar a la mostrada por la figura 14.

Figura 14. **Potencia recibida en un terminal en movimiento**

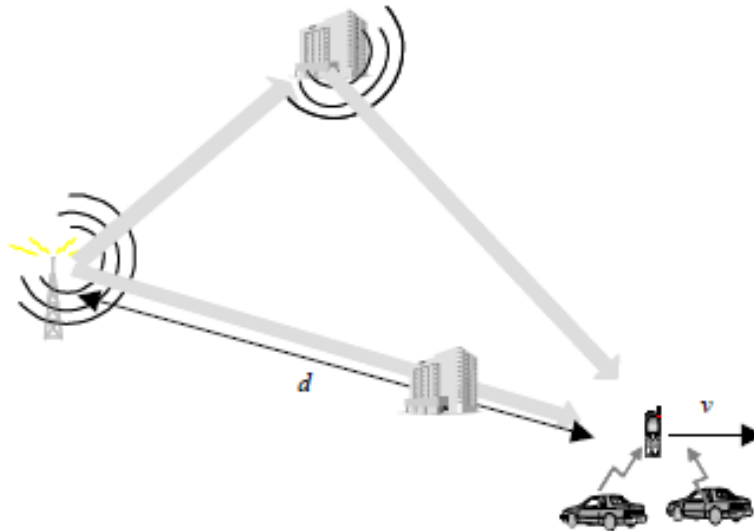


Fuente: Empresa Telecomunicaciones de Guatemala S.A.

Existen diversas componentes provocadas por distintas causas que afectan al nivel de señal. Las variaciones del nivel de la señal están asociadas generalmente a cambios en la posición del terminal móvil, aunque también pueden producirse por cambios en los objetos en los que se producen las reflexiones.

El nivel de señal recibido por un terminal móvil depende de la distancia, difracciones en objetos interpuestos, atenuaciones debidas a objetos entre las antenas, vegetación, paredes, etc., la refracción atmosférica y las reflexiones producidas por objetos lejanos y próximos. Los efectos de estos fenómenos físicos pueden ser tratados de forma simplificada mediante una caracterización que contempla por separado los diferentes aspectos ilustrados en la figura 15.

Figura 15. **Fenómenos que afectan a la señal recibida en un teléfono móvil**



Fuente: [www.valeriasanchez.mex.tl/350347\\_fenomenos-con-las-ondas-de-propagacion](http://www.valeriasanchez.mex.tl/350347_fenomenos-con-las-ondas-de-propagacion).  
Consulta julio de 2012.

En particular, la señal recibida en el terminal móvil depende de:

- Pérdidas de propagación debidas a la distancia entre antenas
- Desvanecimientos producidos por la obstaculización de la señal provocada por las variaciones del terreno, montañas, edificios, etc.
- Variaciones en el nivel de señal producidas por la múltiple reflexión de ésta en los objetos cercanos al terminal móvil.
- Desplazamiento en la frecuencia portadora de la señal producido por el movimiento del terminal.
- Los efectos provocados por la propagación multicamino producida por las reflexiones en objetos lejanos.

En los siguientes apartados se describirán cada uno de los efectos por separado.

## 2.2. Pérdidas de propagación

Uno de los aspectos básico en el diseño de un sistema móvil es el de determinar qué nivel de potencia medio se recibirá en un receptor situado a una distancia  $d$  de la antena transmisora. Las ecuaciones de Maxwell permiten predecir la potencia recibida,  $P$ , en el espacio libre según la siguiente ecuación:

$$P = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{4\pi d^2} \quad 2.1$$

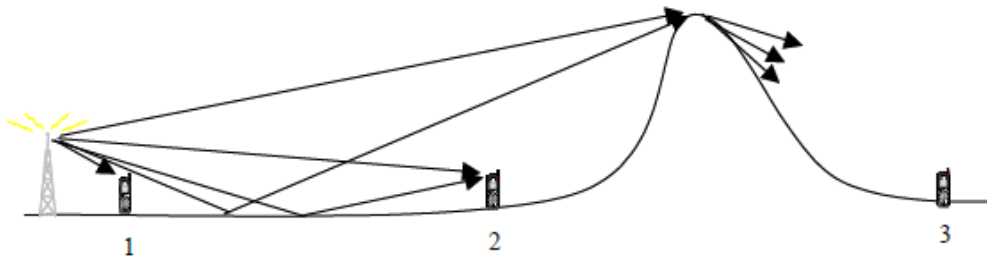
Donde  $P_T$  es la potencia transmitida,  $G_T$  y  $G_R$  son las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras,  $\lambda$  la longitud de onda y  $d$  la distancia. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia queda determinada por  $f\lambda = c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz.

A partir de la anterior ecuación se definen las pérdidas de propagación,  $L$ , como la relación entre potencia emitida y potencia recibida utilizando antenas con ganancia unitaria:

$$L = \frac{c^2}{4\pi f d^2} \quad 2.2$$

Por tanto, en el espacio libre la diferencia entre la potencia recibida y la potencia transmitida depende del inverso del cuadrado de la distancia, de modo que cada vez que se duplica la distancia se produce una atenuación de 6 dB. También debe resaltarse que para frecuencias mayores la atenuación aumenta. Por tanto, a igual potencia transmitida y utilizando antenas de igual ganancia los sistemas que emplean frecuencias portadoras mayores tienen menor alcance.

Figura 16. **Mecanismos involucrados en las pérdidas de propagación según la distancia**



Fuente: [www.valeriasanchez.mex.tl/350347\\_fenomenos-con-las-ondas-de-propagacion](http://www.valeriasanchez.mex.tl/350347_fenomenos-con-las-ondas-de-propagacion).

Consultado: julio de 2012.

En un entorno móvil, caracterizado por la baja altitud de las antenas respecto al terreno, no puede considerarse válida la hipótesis de propagación en espacio libre y, por lo tanto, que las pérdidas de propagación se ajusten a las proporcionadas por  $L$ . Para comprender mejor la complejidad en cálculo de las pérdidas de propagación en un entorno móvil se puede observar en la figura 16 cómo existen diversos mecanismos que intervienen en el cálculo y su dependencia de la distancia y los obstáculos entre antenas.

En efecto, en la posición 1, la utilización del modelo de espacio libre proporcionaría una estima relativamente correcta de las pérdidas, aunque podría ser necesaria la introducción de factores correctores si existiesen objetos interpuestos, paredes, vegetación, etc.

Si el terminal se desplaza hasta la posición 2, todavía existe visibilidad directa pero las reflexiones del plano de tierra pueden provocar una influencia en las pérdidas de propagación. En estas situaciones un modelo apropiado es

el de Tierra Plana [LEE – 93]. En este modelo se consideran la reflexión en el suelo y la ecuación que predice las pérdidas es

$$P = P_T G_T G_R \frac{h_1 h_2}{4\pi d}^2 \quad 2.3$$

Donde  $h_1$  y  $h_2$  son las alturas de las antenas y se cumple

$$d \gg \frac{2\pi}{\lambda} h_1 h_2 \quad 2.4$$

Por tanto, existe una dependencia del inverso de la cuarta potencia de la distancia, de modo que al duplicarse la distancia la atenuación se incrementa en 12 dB. Además, también pueden establecerse correcciones por atenuaciones producidas por objetos interpuestos similares a las comentadas en la posición 1.

Finalmente, en el punto 3, las pérdidas debidas al espacio libre deben ser corregidas al producirse pérdidas por difracción de la señal causada por los objetos interpuestos entre las antenas. Si se tiene en cuenta que en la mayoría de situaciones suelen haber múltiples objetos que producen difracciones y reflexiones de la señal, se hace necesario el desarrollo de modelos simplificados que permitan determinar las pérdidas de forma aproximada.

Existen dos grandes conjuntos que permiten estimar las pérdidas de propagación, uno de ellos basado en una mayor o menor simplificación de la óptica geométrica, que considera todos los obstáculos como objetos de un tamaño mucho mayor a la longitud de onda.

Mediante estos modelos se pueden considerar las reflexiones, refracciones, difracciones e incluso la propagación por dispersión troposférica

en función de la distancia entre antenas, los obstáculos existentes entre ellas o la frecuencia portadora.

El otro conjunto de modelos se basan en la imposibilidad de realizar simplificaciones en contextos muy complejos con múltiples trayectorias y obstáculos. Estos modelos se basan en generar grandes conjuntos de medidas empíricas realizadas en distintas zonas con características de propagación similares, como ciudades, zonas rurales, zonas montañosas, etc. Estas medidas son analizadas estadísticamente de forma que se crean curvas o tablas que permiten estimar los niveles de señal en condiciones similares.

Estos modelos describen la atenuación entre la antena transmisora y receptora como función de la distancia y otros parámetros. La mayoría de ellos predicen las pérdidas de propagación en función del inverso de la distancia elevada a un factor  $n$  entre 3 y 4 con correcciones en función de la vegetación, tipo de entorno (montañoso, llano, urbano etc.), número y composición de las paredes, altura de las antenas e incluso perfil topográfico.

### **2.3. Modelo básico de propagación en el espacio libre**

Las ondas electromagnéticas enviadas por la antena de un transmisor, viajan propagándose por el espacio y finalmente alcanza otra antena. El nivel de energía de la señal decrece muy rápido con la distancia desde la antena transmisora. La onda electromagnética también se ve afectada por objetos que encuentran en su camino, como árboles edificios y otras estructuras grandes. Además, la trayectoria que toma una señal electromagnética hasta una antena receptora depende de factores como la frecuencia de la señal, las condiciones atmosféricas y la hora del día. Todos estos factores pueden considerarse para

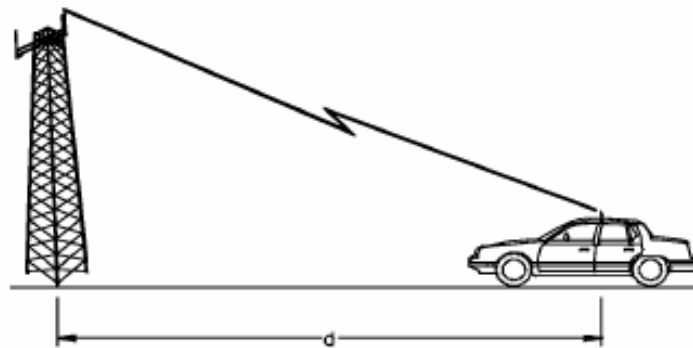


predecir la propagación de las ondas de radio desde el transmisor hasta el receptor. Entre algunos modelos básicos se tienen:

### 2.3.1. Modelo de espacio libre

El modelo de espacio libre es el más simple de todos, asume que el canal de RF está libre de cualquier obstáculo que puede afectar a la propagación como absorción, difracción, reflexión o dispersión. Tiene muy poco uso para realizar predicciones para telefonía celular pero dada su sencillez muchas veces puede usarse para realizar cálculos rápidos. Las pérdidas por trayectoria serán solamente función de la distancia entre transmisor y receptor

Figura 17. Modelo espacio libre



Fuente: [www.escet.urjc.es](http://www.escet.urjc.es), tema3. Consulta: agosto de 2012.

La pérdida de camino entre transmisor y receptor se expresa como:

$$L_{el} = 10 * \log \frac{4\pi d}{\lambda}^2 \quad 2.5$$

Dónde:

d: Distancia m

$\lambda$ : Longitud de onda m

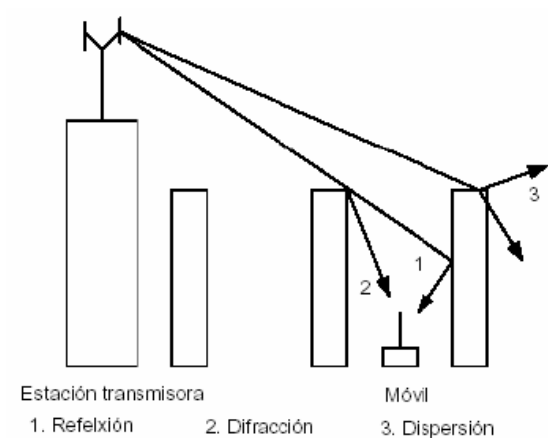
Escribiendo  $\lambda = \frac{c}{f}$  y expresando las pérdidas en dB:

$$L_{el} = 32.4 + 20 * \log d + 20 * \log f \quad 2.6$$

Donde f se expresa en Mhz.

En un ambiente urbano típico en las comunicaciones móviles, hay que considerar los efectos provocados por la superficie de la tierra, así como los diferentes fenómenos que afectan la propagación (reflexión, difracción y dispersión) con ello se mejora la exactitud del modelo.

Figura 18. **Mecanismos de propagación en ambiente urbano**



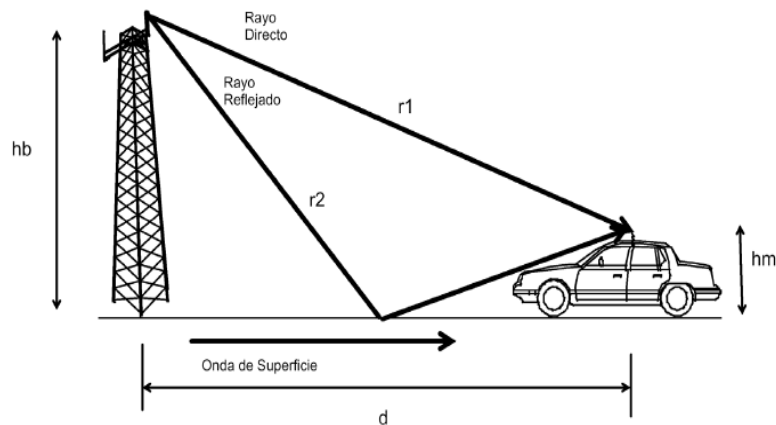
Fuente: elaboración propia, HyperSnap 6.

### 2.3.2. Modelo de propagación de los 2 rayos o de plano de tierra

El campo electromagnético puede ser modelado por 3 diferentes componentes, el rayo directo, el reflejado y la onda de superficie como se puede observar en la figura 19.

La onda superficial puede ser despreciada para las frecuencias utilizadas en las comunicaciones móviles. Surge de esta manera el modelo de 2 rayos o de plano de tierra. Dada las distancias comprendidas entre transmisor y receptor en telefonía celular se puede considerar a la tierra plana.

Figura 19. Modelo de dos rayos



Fuente: [www.escet.urjc.es](http://www.escet.urjc.es), tema 3. Consulta: agosto de 2012.

Asumiendo reflexión perfecta y si  $h_b * h_m \ll \lambda * d$ , se deduce:

$$L_{IV} = L_{el} + 20 * \log \frac{\lambda d}{4\pi h_b h_m} \quad 2.7$$

Reemplazando  $L_{el}$  por la Ecuación 2.3:

$$L_{IV} = 40 * \log d - 20 * \log h_b h_m \quad 2.8$$

Dónde:

$h_b$ : Altura antena estación base (transmisor) m

$h_m$ : Altura antena estación móvil (receptor) m

d: Distancia entre antena transmisora y receptora m

El modelo es apropiado para estimaciones de atenuación cuando no hay obstrucciones entre transmisor y receptor y la distancia no es demasiado grande pues si la distancia se incrementa es necesario considerar la curvatura de la tierra. En la ecuación 2.8 se puede ver que la pérdida de trayectoria se incrementa con potencia 4 en función de la distancia (lo cual se ajusta mejor a la realidad que la potencia 2 de espacio libre). Por otra parte no hay una dependencia explícita con la frecuencia en este modelo.

Los entornos reales son, por supuesto, totalmente diferentes al modelo de tierra plana. Sin embargo, en la realización de medidas de intensidad de campo, normalmente, el punto de inflexión perceptible. Si se pudiera determinar el punto de inflexión exactamente, esto conllevaría un gran beneficio en la planificación de la red: la celda en servicio llegaría hasta el punto de inflexión, así se generarían menos interferencias en las áreas cercanas.

### **2.3.3. Modelo de Egli**

En el año 1957 luego de realizar gran cantidad de mediciones Egli concluyó que la atenuación de la señal decrecía con la potencia 4 de la

distancia y, en contraste con el modelo de dos rayos, era dependiente de la frecuencia. Propuso un modelo semiempírico dado por:

$$L_{IV} = 40 * \log d - 20 * \log h_b h_m + 20 * \log \frac{f}{40} \quad 2.9$$

Dónde:

f: Frecuencia Mhz

$h_b$ : Altura antena estación base (transmisor) m

$h_m$ : Altura antena estación móvil (receptor) m

d: Distancia entre antena transmisora y receptora m

Este modelo es válido para frecuencias superiores 40 MHz e inferiores 1 GHz y terrenos irregulares.

## **2.4. Okumura, Hata y sus modelos relacionados**

Los modelos anteriormente presentados son de baja importancia en las comunicaciones móviles dado que éstas se desarrollan en su mayor parte en ambientes urbanos. Los primeros estudios en esta dirección surgieron en Japón hacia finales de los 60; teniendo como principal precursor a Okumura.

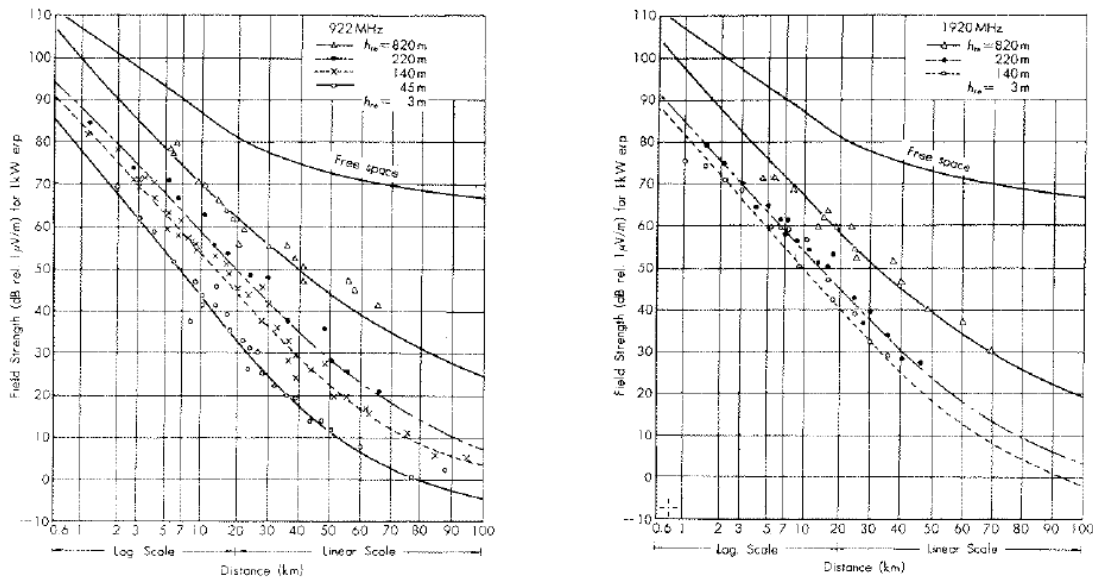
### **2.4.1. Método de Okumura**

El modelo de Okumura es el más difundido. Es completamente empírico basado en una gran cantidad de mediciones realizadas en el área de Tokio. Los resultados analizados estadísticamente y son mostrados en una serie de curvas que muestran el nivel de señal en función de la distancia para diferentes alturas de antenas y frecuencias. Dado que todas las mediciones fueron realizadas en

terreno casi plano y área urbana, Okumura introdujo factores de corrección para ajustar la predicción en áreas abiertas y diferentes tipos de terreno: montaña, mar, sierra, etc. Este modelo es válido para frecuencias entre 150 – 1920 MHz, distancias de 1 – 100 km y altura de antenas de estación base entre 30 y 1000 mts.

En la figura 20 se pueden ver algunas de las curvas de registradas por Okumura luego de sus mediciones.

Figura 20. Curvas de Okumura



Fuente: OKUMURA, Y. OHMORI, E. KAWANO, T. FUKUDA, K. Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service, Rev. Elec. Commun. Lab. 1968. p. 825.

Las pérdidas para este modelo se calculan con la ecuación

$$L_0 = L_{el} + A - G h_b - g h_m - G_A \quad 2.10$$

Dónde:

$L_{el}$ : Atenuación de espacio libre, Ecuación 2.2

A: Atenuación relativa, obtenida de las curvas

$h_b$ : Altura antena transmisora m

$h_m$ : Altura antena receptora m

G: Ganancia de acuerdo al tipo de morfología

Okumura encontró que  $G_{h_b}$  tiene una variación de pérdida de 20dB/decada y que  $G_{h_m}$  tiene una variación de 10dB/decada para alturas menores a 3 m.

$$G_{h_b} = 20 * \log \frac{h_b}{200} \quad \text{Para } 30\text{m} < h_b < 1000\text{m} \quad 2.11$$

$$G_{h_m} = 10 * \log \frac{h_m}{3} \quad \text{Para } h_b < 3\text{m} \quad 2.12$$

$$G_{h_m} = 20 * \log \frac{h_m}{3} \quad \text{Para } 3\text{m} < h_b < 10\text{m} \quad 2.13$$

El modelo se ajusta bien en regiones urbanas pero no así en áreas abiertas, además, tiene la gran desventaja de depender de la interpretación de curvas para obtener el resultado.

#### **2.4.2. Método de Okumura-Hata**

El método que utilizó Okumura era laborioso ya que requería la correcta interpretación de la información obtenida de las gráficas de acuerdo a la zona en que se aplicara, por esta razón algunos científicos se interesaron en continuar las investigaciones al respecto siendo uno de los más destacados el científico de apellido Hata.

Masaharu Hata definió por medio de ecuaciones matemáticas las características de propagación encontradas por Okumura. Hata basó sus investigaciones en la consideración de que las señales de RF se comportaban de una manera logarítmica, así mismo propuso ecuaciones para ambientes suburbanos y rurales, para sus ecuaciones consideró un terreno ligeramente montañoso, con elevaciones menores a veinte metros. A partir de estos desarrollos surgió el primer modelo de propagación el Modelo: Okumura-Hata.

El modelo es una formulación empírica de los datos de las pérdidas de propagación provistos por Okumura, y es válido en el rango de frecuencias de VHF y UHF, de los 150 MHz a los 1500 MHz. Aunque Hata presentó las pérdidas dentro de un área urbana como una fórmula estándar:

$$L_u = 69.55 + 26.16 * \log f_c - 13.82 * \log h_b - a h_m + 44.9 - 6.55 * \log h_b * \log d \quad 2.14$$

Tomando en cuenta que:

$$150 \text{ Mhz} < f_c < 1500 \text{ Mhz} \quad 2.15$$

$$30 \text{ m} < h_b < 200 \text{ m} \quad 2.16$$

$$1 \text{ m} < h_{re} < 10 \text{ m} \quad 2.17$$

Se debe considerar que las definiciones son las mismas que para el modelo de Okumura, incluyendo:



- $f_c$  : Frecuencia portadora Mhz  
 $h_b$  : Altura antena transmisora m  
 $h_m$  : Altura antena receptora m  
 $a$   $h_m$  : Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil que es función del tipo de área de servicio.  
 $d$  : Distancia entre transmisor y receptor km

Como se puede observar, involucra una nueva variable que es el factor de corrección de la antena del móvil y se define según el tamaño de la ciudad:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a h_m = 1.1 * \log f_c - 0.7 * h_m - 1.56 * \log f_c - 1.8 \quad 2.18$$

Para ciudades grandes:

$$a h_m = \begin{cases} 8.29 * \log 1.54 * h_m^2 - 1.1 & \text{para } f_c < 300 \text{ Mhz} \\ 3.2 * \log 11.75 * h_m^2 - 4.97 & \text{para } f_c > 300 \text{ Mhz} \end{cases} \quad 2.19$$

Para utilizar la misma fórmula en un ambiente suburbano se utiliza como:

$$L_{\text{suburbano}} = L_u - 2 * \log \frac{f_c}{28} - 5.4 \quad 2.20$$

Para áreas rurales:

$$L_{\text{rural}} = L_u - 4.78 * \log f_c^2 + 18.33 * \log f_c - 40.94 \quad 2.21$$

Este modelo se adapta muy bien para el diseño de sistemas de gran escala, pero no para sistemas PCS, los cuales tienen células del orden de

1 Km de radio. Para éste efecto se hace una formulación numérico empírica de los datos gráficos entregados por Okumura de atenuación para zonas urbanas.

A pesar de que el modelo de Hata no tiene correcciones específicas para distintas rutas, que en cambio sí existen para el modelo de Okumura, las predicciones de Hata son muy similares a las predicciones de Okumura para distancias  $T_x - R_x$  mayores a 1 km.

Este modelo se adapta muy bien para predicciones de gran escala, pero no para zonas densas donde los radios de celda son inferiores a 1 km, además, no puede utilizarse para las bandas de PCS en 1900 MHz licenciadas en América ni para la banda de 1800 MHz en GSM.

### 2.4.3. Modelo CCIR

El CCIR introdujo una pequeña modificación en el modelo propuesto por Hata para quitar la limitación en distancia de 20 km y extender el rango de utilización del modelo hasta 100 km entre transmisor y receptor. Ámbitos de aplicación del modelo:

- Frecuencia  $f$  (150 – 1500 Mhz)
- Distancia  $d$  (1 – 100km)
- Altura antena estación base  $h_b$  (30 – 200m)
- Altura antena estación móvil  $h_m$  (1 – 10m)

$$L_h = 69.55 + 26.16 * \log f - 13.82 * \log h_b - a h_m + 44.9 - 6.55 * \log h_b * \log d - B \quad 2.22$$

Dónde:

f: Frecuencia Mhz

$h_b$ : Altura antena estación base (transmisor) m

$h_m$ : Altura antena estación móvil (receptor) m

d: Distancia entre antena transmisora y receptora km

$$a_{h_m} = 1.1 * \log f - 0.7 * h - 1.56 * \log f + 0.8 \quad 2.23$$

$$B = 30 - 25 * \log \% \text{ area cubierta por edificios} \quad 2.24$$

Como se ve el modelo es igual al modelo Okumura-Hata para ciudades pequeñas con el agregado de la corrección del factor B. Debido a la simplicidad de la corrección el modelo es aceptable para zonas urbanas, en cambio, para zonas abiertas se aleja mucho de los valores medidos.

#### **2.4.4. Modelo Hata extendido (COST231)**

El grupo COST (Cooperativa Europea para Investigación Científica Técnica) introdujo modificaciones al modelo de Hata para extender su rango de uso a las frecuencias entre 1500 MHz y 2000 MHz esto se debió al advenimiento de PCS en la banda de 1900 MHz (USA) y la asignación de bandas en 1800 MHz para GSM (Europa) donde el modelo de Hata no puede aplicarse. También se lo conoce como Cost-Hata-Model y quedó plasmado en el COST231 Final Report: Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems. La ecuación de atenuación para las frecuencias hasta 1500 MHz adoptada por COST son las del modelo de Hata, ecuación 2.14 y la modificación introducida para las frecuencias de 1500 MHz a 2000 MHz es:

$$L_c = 46.3 + 33.9 * \log f - 13.82 * \log h_b - a h_m + 44.9 - 6.55 * \log h_b * \log d - C_m \quad 2.25$$

Dónde:

f: Frecuencia Mhz

$h_b$ : Altura antena estación base (transmisor) m

$h_m$ : Altura antena estación móvil (receptor) m

d: Distancia entre antena transmisora y receptora km

a  $h_m$  : es la altura de la estación móvil presentada en las ecuaciones 2.18 y 2.19.

$$C_m = 0 \text{ dB} \quad 2.26$$

Para ciudades tamaño medio y centros suburbanos con densidad media de árboles.

$$C_m = 3 \text{ dB} \quad 2.26$$

Para centros metropolitanos

El dominio de uso de éste modelo es:

- Frecuencia  $f$  150 – 2000 Mhz
- Distancia  $d$  1 – 20km
- Altura antena estación base  $h_b$  30 – 200m
- Altura antena estación móvil  $h_m$  (1 – 10m)

#### 2.4.5. Modelo de Ikegami

Ikegami investigó los mecanismos de propagación en ambientes urbanos. Sus estudios se centraron en las pérdidas introducidas por difracción en las terrazas de los edificios. Dos ondas difractadas alcanzan la antena de un móvil, una de ellas es reflejada en un edificio y la otra es un rayo directo. La contribución de estas dos ondas es sumada y la atenuación debida difracción en terraza a la calle puede ser calculada con:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 * \log w + 20 * \log h_{\text{roof}} - h_m + 10 * \log f + 10 * \log \text{sen } \varphi \quad 2.27$$

Dónde:

f: Frecuencia Mhz

$h_m$ : Altura antena estación móvil (receptor) m

w: Ancho de la calle

$h_{\text{roof}}$ : Altura de edificios

$\varphi$ : Orientación de la calle respecto a la onda incidente [grados]

El modelo fue totalmente desarrollo sobre cálculos teóricos. Se comparó el modelo con mediciones y los resultados no fueron buenos.

#### 2.4.6. Modelo Walfisch-Bertoni

Walfisch y Bertoni también realizaron estudios teóricos en ambientes urbanos teniendo en cuenta los efectos de difracción en los techos de los edificios. Concluyeron que en la atenuación intervienen 3 factores:

- Pérdidas de espacio libre
- Reducción del campo incidente sobre las terrazas de edificios debido a la difracción previa en varios edificios.
- Pérdidas por difracción en las terrazas de edificios hasta el nivel del piso.

La contribución de los 2 últimos términos es denotado por  $L_{EX}$  [dB]. Walkfish y Bertoni asumieron un área con edificios de altura uniforme y con calles paralelas. Entonces:

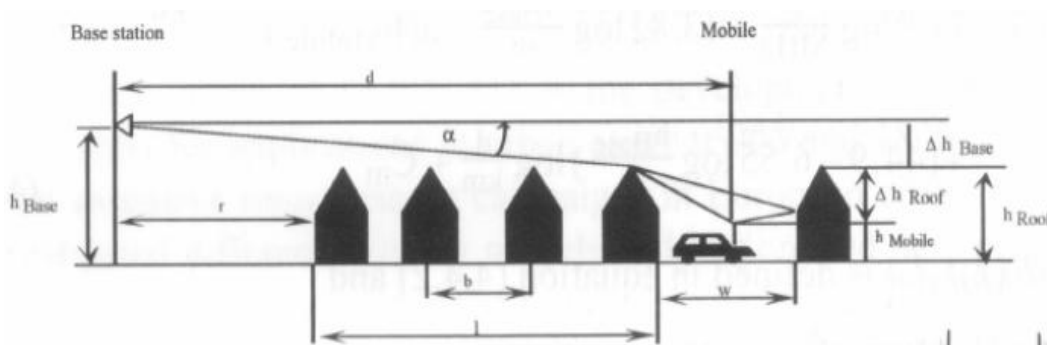
$$L_{EX} = 57.1 + A + \log f - 18 * \log \alpha \quad 2.28$$

Dónde:

$\alpha$ : Ángulo entre la onda incidente y tierra [rad]

f: Frecuencia [MHz]

Figura 21. **Parámetros modelo Walfisch-Bertoni**



Fuente: [www.slideshare.net/eliche04/modelo-de-walfisch-bertoni](http://www.slideshare.net/eliche04/modelo-de-walfisch-bertoni). Consulta: agosto de 2012.

Para nivel de terreno,  $\alpha$  está dado por:

$$\alpha = \frac{\Delta h_{\text{base}}}{d} - \frac{d}{2 * R_e} \quad 2.29$$

Dónde:

$\Delta h_{\text{base}}$ : Diferencia entre altura de edificios y altura de antenas de estación base  
m .

$\alpha$ : Se asume pequeño

$R_e$ : Radio efectivo de la tierra, 8.5x10<sup>6</sup> km

$d$ : Distancia entre transmisor y receptor [m]

El término A se debe a la difracción en las terrazas:

$$A = 5 * \log \frac{b^2}{2} + h_{\text{roof}} - h_m^2 - 9 * \log b + 20 * \log \arctg \frac{2 h_{\text{roof}} - h_m}{b} \quad 2.30$$

La contribución debida a espacio libre  $L_{el}$  es la dada por la ecuación 2.6. La pérdida total según el modelo de Walfish-Bertoni viene dada por:

$$L_{WB} = L_{EX} + L_{el} \quad 2.31$$

#### 2.4.7. Modelo de Lee

Lee propuso un modelo de propagación en el año 1982 que fue rápidamente adoptado en Estados Unidos de América, debido a que sus parámetros son fácilmente ajustados al ambiente local. El modelo consiste de 2 partes. La primera parte, predicción área a área, es usada para predecir las pérdidas sobre terreno plano, sin tener en cuenta la configuración particular del terreno.

Obviamente, esta predicción es inadecuada para zonas montañosas. La segunda parte usa la predicción área a área como base y desarrolla punto a punto para resolver el problema. Basándose en el perfil del terreno tiene en cuenta las condiciones de línea de vista o no línea de vista y la influencia de las reflexiones. Además, cuando no se da la condición de línea de vista, las obstrucciones son modeladas como filo de cuchillo y se calcula la refracción.

El modelo básico área-a-área se encuentra parametrizado por  $P_{r0}$  (potencia a 1 milla) y por  $\gamma$  (pendiente de curva de pérdidas experimentalmente determinada), su ecuación viene dada por:

$$P_r = 10 * \log P_{r0} \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} * \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-n} * \alpha_0 \quad 2.32$$

Dónde:

$P_r$ : Intensidad de campo recibida a la distancia  $r$  desde el transmisor

$P_{r0}$ : Potencia recibida a 1 milla

$r$ : Distancia entre móvil y antena de estación base

$r_0$ : 1 milla (1,6 km)

$\gamma$ : Pendiente pérdidas

$f$ : Frecuencia utilizada [Mhz]

Lee asume un conjunto de condiciones iniciales, luego el modelo debe ser adaptado para las, las condiciones nominales del modelo son:

- Frecuencia: 900 Mhz
- Altura antenas estación base: 30.48 mts
- Potencia del transmisor: 10 Watt



- Ganancia antena estación base: 8.15 dBi
- Altura antena del móvil: 3 mts
- Ganancia antena del móvil: 2.15 dBi

Factor de corrección:

$$\alpha_0 = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 \quad 2.33$$

$$\alpha_1 = \frac{\text{Altura antena estación base (mts)}^2}{30.48} \quad 2.34$$

$$\alpha_2 = \frac{\text{Altura antena estación Móvil (mts)}^v}{3} \quad 2.35$$

$$\alpha_3 = \frac{\text{Potencia Transmitida (Watt)}}{10} \quad 2.36$$

$$\alpha_4 = \frac{\text{Ganancia antena estación base respecto al radiador isotrópico}}{6.53} \quad 2.37$$

$$\alpha_5 = \frac{\text{Ganancia antena estación móvil respecto al radiador isotrópico}}{1.64} \quad 2.38$$

Y donde v es un dato determinado empíricamente y especificado como:

$$v = \begin{cases} 2 & \text{para altura de antena móvil} > 10 \text{ mts} \\ 1 & \text{para altura de antena móvil} < 3 \text{ mts} \end{cases} \quad 2.39$$

En la Tabla III se pueden ver algunos de los valores empíricamente calculados para  $P_{r0}$  y  $\gamma$ :

Tabla III. **Parámetros modelo de Lee**

Tipo de Zona	$P_{r0}$ dBm	$\gamma$
Área Rural	-57.0	4.03
Forestal o Parque	-57.0	4.45
Área Residencial	-57.0	4.70
Área Suburbana	-59.2	4.73
Área Urbana (Altura de Edificios: hasta 4 pisos)	-61.5	3.54
Área urbana Densa (Altura de Edificios: hasta 6 pisos)	-61.5	5.69
Espacio Libre (Modelo Lee)	-45.0	2.00
Tokio (Urbano)	-84.0	3.05

Fuente: CAMACHO, Diana. TORRES, Gabriel. Tesis Modelo de predicción de Lee, p. 13.

## 2.5. Desvanecimientos en la propagación

El desvanecimiento se debe normalmente a los cambios atmosféricos y a las reflexiones del trayecto de propagación al encontrar superficies terrestres o acuáticas.

La intensidad del desvanecimiento aumenta en general con la frecuencia y la longitud de trayecto. En este estudio se necesita detallar dos tipos de desvanecimientos los cuales son:

### 2.5.1. Desvanecimientos lentos

A partir de los modelos de pérdidas por propagación es posible determinar cuál es el valor esperado de la potencia en función de la distancia, frecuencia, tipo de terreno, etc. Sin embargo, si un terminal móvil describe una

circunferencia alrededor de una antena omnidireccional, el valor medio de la potencia varía en función de los distintos perfiles a medida que cambia su posición.

Esta variación se denomina desvanecimiento lento y se produce por la ondulación del terreno y la interposición de objetos entre las antenas. Si se representa el nivel medio de potencia recibido,  $P_r$  en el móvil de la figura 17 girando alrededor de la antena, se puede observar que la señal sufre una variación en su nivel de potencia en función del perfil del terreno que existe para cada posición, tal y como se muestra en la figura 18.

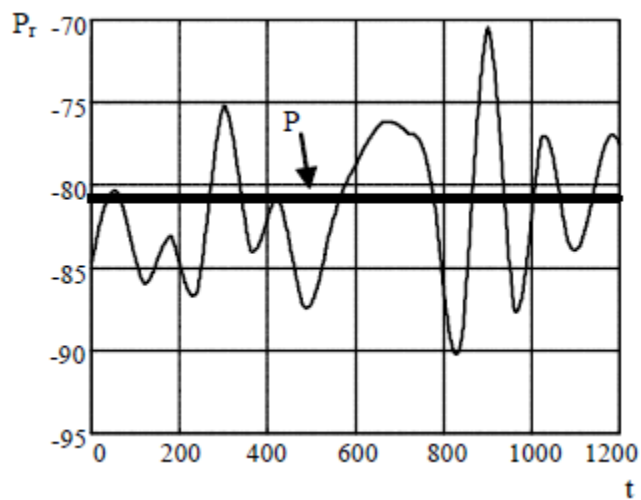
Esta variación se produce alrededor del nivel medio de potencia,  $P$  que nos proporcionan los modelos de propagación. Cuando en su movimiento el terminal móvil se oculta detrás de un edificio o entra en un sótano las condiciones de propagación son adversas y el nivel de potencia sufre una atenuación adicional. Por el contrario, pueden darse condiciones de visibilidad entre antenas especialmente favorables que redunden en un mayor nivel de señal recibido.

Figura 22. **Terminal móvil moviéndose alrededor de una antena omnidireccional**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth y HyperSnap 6.

Figura 23. **Nivel de potencia recibido y nivel de potencia predicho**



Fuente: Empresa Telecomunicaciones de Guatemala, S.A.

A partir de numerosas medidas se ha establecido un modelo estadístico de distribución que representa la función densidad de probabilidad de potencia de los desvanecimientos lentos basada en la función log-normal:

$$f P_r = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{P_r - P}{\sigma}^2} \quad 2.40$$

Donde  $P$  es el valor medio de la potencia y  $\sigma_y$  es la desviación estándar. Ambos valores están expresados en unidades logarítmicas. El valor de  $P$  será predicho por los modelos de pérdidas de propagación del apartado anterior y el valor de  $\sigma_y$  está determinado por el entorno de propagación. Valores típicos están entre 6 y 12 dB. En entornos con muchos edificios o zonas muy montañosas, los valores de la desviación estándar están próximos a los valores grandes, por el contrario los valores de la desviación están más próximos a 6 dB en terrenos con una variación suave del perfil, como por ejemplo un transmisor situado sobre una montaña con valles a todo su alrededor.

Por otro lado, es necesario caracterizar la velocidad de variación del nivel de señal. Ésta cambia a medida que el terminal se desplaza. Además, el nivel de potencia de la señal no varía de forma instantánea, puesto que un terminal no se oculta detrás de un edificio de forma instantánea sino que existe una correlación temporal entre los valores de potencia.

Claramente, la velocidad de variación del nivel de señal depende de la velocidad a la que se desplaza el terminal móvil, pero en cualquier caso se trata de variaciones relativamente lentas en la medida que están originadas por objetos del entorno de tamaño considerable. El valor de la correlación temporal depende nuevamente del tipo de entorno y la velocidad de desplazamiento del terminal móvil. Generalmente se adopta una función de correlación temporal exponencial:

$$R_{\tau} = e^{-\alpha\tau} \quad 2.41$$

El valor de  $\alpha$  modula la mayor o menor variabilidad de la señal y depende de la velocidad del terminal y del tipo de terreno. A mayor velocidad, la señal varía de forma más rápida y por tanto el valor de  $\alpha$  también es mayor. De forma similar, en morfologías abruptas las variaciones de la señal son más rápidas.

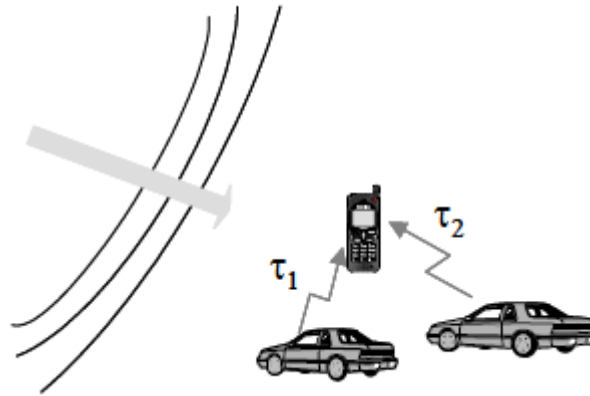
### **2.5.2. Desvanecimientos rápidos**

En un entorno de comunicaciones móviles, la señal recibida en un determinado instante y lugar es la resultante de la suma de todas las trayectorias provocadas por las reflexiones del frente de onda en los objetos cercanos en dirección a la antena receptora.

Cada uno de los rebotes incide con una amplitud y fase distintas, que depende del coeficiente de reflectividad, y con un retardo distinto. Sin embargo, si los objetos están muy próximos a la antena receptora la diferencia entre los distintos retardos es prácticamente despreciable comparada con la duración del símbolo de la señal digital.

No obstante, al transmitir la señal modulada, es decir multiplicada por una portadora, el efecto de retardos distintos implica que la señal incide en la antena con fases totalmente distintas. Si en la figura 15, se amplía la zona próxima al terminal móvil, se puede observar que los objetos cercanos, en este caso automóviles que circulan en las inmediaciones del terminal, pueden reflejar el frente de onda en dirección a éste, tal y como se muestra en la figura 18. Cada una de las reflexiones introduce un retardo adicional distinto, puesto que recorren distancias distintas.

Figura 24. Rayos reflejados en objetos próximos al terminal móvil



Fuente: Principios de comunicaciones Móviles, [www.books.google.com.gt](http://www.books.google.com.gt), p. 58. Consulta: agosto de 2012.

## 2.6. Estadísticas de la envolvente de la señal recibida

La suma de los rayos multitrayecto tiene un efecto que puede ser constructivo o destructivo. Los niveles de señal son aleatorios, puesto que dependen de la distribución de los retardos de las diferentes trayectorias, así como de los coeficientes de reflectividad de los objetos en los que se producen. A partir de diversas observaciones empíricas se han realizado estudios estadísticos que permiten distinguir entre dos casos claramente diferenciados: entornos con visibilidad directa entre antenas (LOS, Line Of Sight) o sin visibilidad entre las antenas (NLOS, Non Line of Sight).

Cuando no existe visibilidad directa entre las antenas se puede suponer que el número de reflexiones que inciden en la antena receptora es muy grande. Entonces, aplicando el teorema central del límite, se puede aproximar las componentes en fase y en cuadratura de la señal  $x(t)$  e  $y(t)$  por procesos

gaussianos independientes, de media cero y varianza igual al nivel de potencia media recibida:

$$r(t) = e^t \cos \omega_0 t + \phi(t) \quad 2.42$$

Dónde:

$$e^t = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad 2.43$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{y(t)}{x(t)} \quad 2.44$$

Así, la función de densidad de probabilidad de la envolvente de señal resulta una función de Rayleigh:

$$f_e(r) = \frac{r}{P_r} e^{-\frac{r^2}{2P_r}} \quad 2.45$$

Donde  $P_r$  es el nivel medio de potencia local de la señal recibida  $r(t)$ :

$$P_r = E[r^2(t)] = \frac{E[e^2(t)]}{2} \quad 2.46$$

Si se calcula la estadística de la potencia instantánea recibida,  $P_i$ , se tiene una variable aleatoria exponencial de media  $P_r$ :

$$f_{P_i}(P_i) = \frac{1}{P_r} e^{-\frac{P_i}{P_r}} \quad P_i > 0 \quad 2.47$$

Nótese que  $P_r$  es, a su vez, una variable aleatoria sujeta a los desvanecimientos lentos, que se caracteriza con una distribución log-normal, y que por tanto irá variando a lo largo del tiempo a medida que el móvil se vaya desplazando y cambie el entorno (edificios, montañas, etc.). En escenarios



donde se tiene visibilidad directa, la componente en fase o la de cuadratura tendrá un valor de continua  $A$ , distinto de cero. En este caso se utiliza una función de densidad de probabilidad de la envolvente denominada Nakagami-Rice:

$$f_e e = \frac{e}{P_r} e^{-e^2 + A^2} I_0 \frac{eA}{P_r} U e \quad 2.48$$

Para este modelo se puede definir

$$k = \frac{A^2}{2P_r} \quad 2.49$$

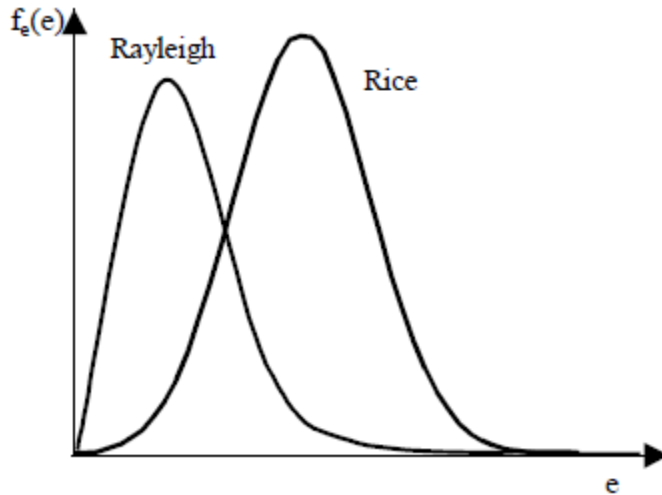
Como cociente entre las potencias del rayo principal y la potencia media local producida por las reflexiones cercanas. Así, la potencia media es

$$P_m = \frac{A^2}{2} + P_r = P_r (1 + k) \quad 2.50$$

De modo que la función densidad de probabilidad de la envolvente es

$$f_e e = \frac{e}{P_m} (1 + k) e^{-k - \frac{e^2 (1+k)}{P_m}} I_0 2e \frac{\sqrt{k(1+k)}}{P_m} \quad e > 0 \quad 2.51$$

Figura 25. **Funciones de densidad de probabilidad Rayleigh y Rice**



Fuente: [www.arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20110622JoseMariaLalueza](http://www.arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20110622JoseMariaLalueza). p. 26-29.

Si se compara en la figura 25 las funciones de densidad de probabilidad Rayleigh y Rice, se puede observar que la probabilidad de tener valores de envolvente de señal pequeños es mucho menor cuando existe visibilidad directa entre las antenas, puesto que, como es de suponer, el rayo directo presenta niveles de señal mucho mayores respecto a los reflejados y, por tanto, para que se produzca una disminución significativa en el nivel de señal, es necesario que los rayos reflejados en los objetos próximos sumen sus contribuciones de señal en contrafase respecto al rayo directo.

### **3. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

#### **3.1. Introducción**

Un mapa tradicional es una representación analógica (o continua) de la realidad sobre un espacio geográfico. Fielmente ubica una región, desniveles, población, etc. pero no basta sólo ubicar lugares geográficos, las necesidades del hombre se incrementan conforme el paso del tiempo, asimismo los mapas al estar compuestos de puntos, líneas y áreas, se convierten en el medio más compacto de almacenamiento de datos y la forma más compleja de extraer información.

Así emergen nuevas tendencias en la forma de utilizar los mapas para valoración de recursos y planificación; igualmente se observó que las diferentes porciones de la superficie de la tierra no son independientes entre sí, por el contrario guardan algún tipo de relación, por esta razón es indispensable evaluarlas de una forma integrada.

En un principio la manera más sencilla de hacer esta integración, fue superponiendo y encontrando puntos de coincidencia en los distintos mapas de datos descriptivos sobre copias transparentes de mapas de coberturas sobre mesas iluminadas, pero ninguno de los métodos desarrollados posteriormente logró ser aceptado por profesionales por la carencia de exactitud y el exceso de restricciones.

La solución de las restricciones fue introducir datos a una computadora, y como un mapa analógico no está adaptado para ser procesado por una

computadora que trabaja con datos discretos (digitales), el punto de partida es precisamente la transformación a un formato digital.

Sus aplicaciones son numerables: desde infraestructura (redes de electricidad, agua, teléfono), medio ambiente (proyectos de impacto ambiental) hasta geomarketing (rutas óptimas para comerciales, anuncios) pues permiten la descripciones de terrenos, definiciones de uso de suelo, caracterización de asentamientos humanos, etc. mediante bases de datos previamente obtenidas.

En telecomunicaciones los sistemas de información geográfica (SIG) se utilizan generalmente en el diseño de enlaces con línea de vista o radiodifusión, por lo tanto es necesario considerar todas las obstrucciones y perfiles de terreno existentes en una trayectoria que afectarán y/o atenuarán cualquier señal que se transmita por los efectos de propagación electromagnética (reflexión, difracción y dispersión).

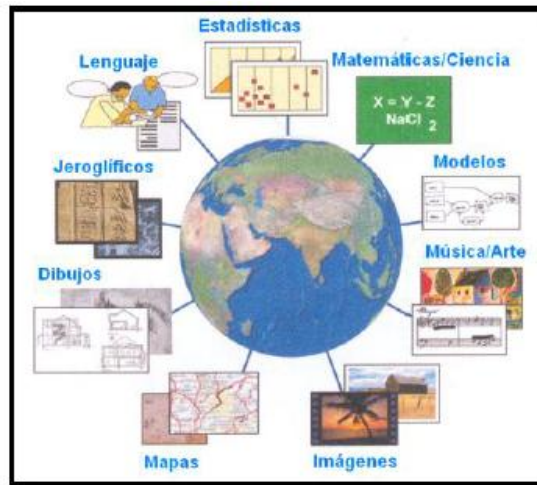
### **3.2. Definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG)**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés Geographic Information System) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información.

La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica puede ser utilizada para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la geografía histórica, el marketing, la logística por nombrar unos pocos. Por ejemplo, un SIG podría permitir a los grupos de emergencia calcular fácilmente los tiempos de respuesta en caso de un desastre natural, o para encontrar los humedales que necesitan protección contra la contaminación, o pueden ser utilizados por una empresa para ubicar un nuevo negocio y aprovechar las ventajas de una zona de mercado con escasa competencia.

De manera más simple y partiendo de lo anterior un SIG es un sistema de computadora que permite coleccionar, procesar, integrar y analizar información que puede ser utilizada para tomar decisiones sobre una porción de la tierra. El concepto de sistema de computadora, enumera grupos de operación necesarios para cualquier SIG, así un SIG opera como una serie de subsistemas dentro en un sistema global.

Figura 26. **Sistema de Información Geográfica**



Fuente: [www.ornl.gov/sci/landscan/landscan\\_documentation](http://www.ornl.gov/sci/landscan/landscan_documentation). Consulta: septiembre de 2012.

### 3.2.1. **Clasificación de los sistemas de información**

Para hacer más clara la naturaleza de un SIG, la figura 27 presenta una taxonomía o clasificación de los sistemas de información. Este diagrama muestra la clasificación entre sistemas de información espacial y no espacial. El SIG se ajusta apropiadamente en la categoría sistemas de información espacial; sus dos principales categorías son: geográfico y no geográfico.

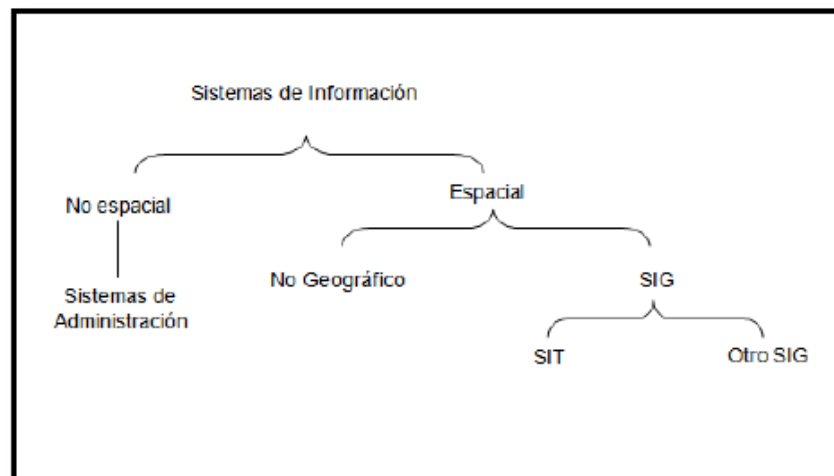
Los sistemas de información no geográfica, aunque frecuentemente traten de alguna porción de espacio geográfico, no están geo codificados. De esta forma sistemas como CAD (diseño asistido por computadora) pertenecen a esta clasificación.

Dentro de los sistemas de información geográfica, existen dos clasificaciones: sistemas de información terrestre (SIT) y sistemas de

información no terrestre u otro SIG. La división es importante porque separa las aplicaciones de la tecnología SIG dentro de aquellos que están enfocados principalmente sobre la tierra y aquellos que, aunque siendo geo codificados, están más enfocados sobre información que puede afectar o ser afectada por factores relacionados con la tierra. Estos usos incluyen censos, cuyo principal enfoque esta sobre la población, vivienda y actividades económicas y tienen poco o impacto indirecto sobre la tierra.

Actividades relacionadas con la tierra proporciona estructura de la segunda y posiblemente la clasificación de SIG más utilizada, el SIG. Estos sistemas están basados sobre propiedades, administración y análisis de porciones de la tierra, por ejemplo actividades que incluyen predicciones de temblores, evaluación de contaminación química, evaluación de hábitat, etc.

Figura 27. **Clasificación de los sistemas de información**



Fuente: Elaboración propia, con programa Word.

### **3.2.2. Estructura de un SIG**

Un sistema de información geográfica se estructura en diferentes conjuntos de información:

#### **3.2.2.1. Mapas interactivos**

Proporcionan una visión interactiva de la información geográfica que permite dar respuesta a preguntas concretas, y presentar un resultado de dichas respuestas. Los mapas proporcionan al usuario las herramientas necesarias para interactuar con la información geográfica además de ser representaciones cartográficas y visualizaciones computarizadas de la geografía utilizada para representar y comunicar fenómenos geográficos.

#### **3.2.2.2. Datos geográficos**

En la base de datos se incluye información Vectorial y Raster (Imagen Matricial), modelos digitales de terreno, redes lineales, información procedente de estudios topográficos, topologías y atributos.

#### **3.2.2.3. Modelos de geo procesamiento**

Son flujos de procesos que permiten automatizar tareas que se repiten con frecuencia, pudiendo enlazar unos métodos con otros.

#### **3.2.2.4. Modelos de datos**

La información geográfica en la Base de datos Geográfica, no sólo es un conjunto de tablas almacenadas en un sistema gestor de base de datos. Incorpora al igual que otros sistemas de Información, reglas de comportamiento e integridad de la información. Tanto el esquema como el comportamiento y las



reglas de integridad de la información juegan un papel fundamental en un sistema de Información Geográfica.

#### **3.2.2.5. Metadatos**

Son los datos que describen la información geográfica, facilitando información como propietario, formato, sistema de coordenadas, etc. de la información geográfica.

#### **3.2.3. Modelos digitales de terreno**

Dos dimensiones son analizadas cuando se habla de objetos geográficos puntuales, lineales o poligonales. Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una representación simplificada de una tercera variable, la altura, que se utiliza para modelar elevaciones en la superficie y otras superficies tridimensionales. La simplificación de datos es necesaria por el número infinito de puntos imposibles de analizar, así se debe generar una versión simplificada pero lo más fiel posible o en contraparte generar más datos si estos no son suficientes; no analiza en su totalidad la tercera dimensión, por lo tanto no se considera como un hecho volumétrico si no una superficie ondulada, levantada en 3 dimensiones.

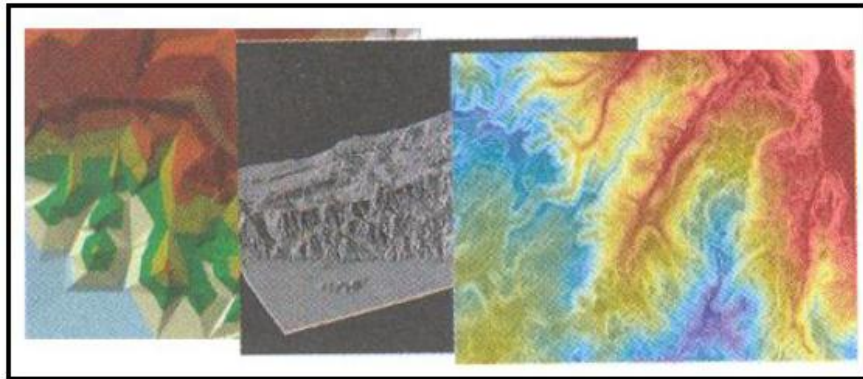
Generalmente un MDT representa la topografía del terreno, en otras palabras, alturas en cada punto o pixel de un territorio, aunque también es posible crear un MDT de cualquier hecho que cumpla esencialmente continuidad espacial. De este modo se pueden representar y analizar gran cantidad de aspectos físicos y/o naturales como temperaturas, composición mineral, tipo de suelo o variables sociales como número de habitantes, densidad de población, etc.

Su creación parte de la información base que proviene básicamente de dos fuentes: el mapa topográfico o la restitución tridimensional de fotografías aéreas del terreno.

La primera fuente trata de la digitalización de alturas contenidas en el mapa topográfico, es decir, es preciso digitalizar las curvas de nivel para generar una representación digital en formato vectorial del mapa de curvas de nivel reales de los datos de prueba. El resultado es un fichero de puntos aleatorios en los cuales se mide la posición geográfica (coordenadas X, Y) y la altura (coordenada Z). La segunda fuente de información se obtiene mediante un modelo estereoscópico, por tanto dispositivos y aparatos obtienen de fotos aéreas un fichero informativo que contiene los tres valores numéricos ya mencionados (X, Y y Z).

Sea cual sea el método de obtención de datos, siempre será necesario realizar un proceso de interpolación espacial para generar los valores alturas en los puntos no muestrales (los puntos estimados) que integrarán el MDT pues habitualmente los datos muestrales no son suficientes para la representación topográfica adecuada.

Figura 28. **Modelos digitales de terrenos**

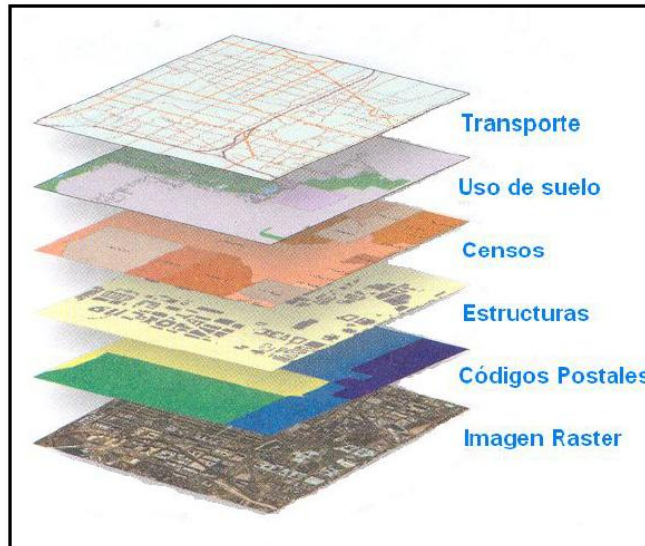


Fuente: [www.ornl.gov/sci/landscan/](http://www.ornl.gov/sci/landscan/). Consulta: septiembre de 2012.

### **3.3. Integración de un sistema**

Con base en los párrafos anteriores, mediante la abstracción de objetos geográficos se pueden realizar representaciones cartográficas, de este modo se convierten a un formato digital (raster o vector) creando así representaciones cartográficas de un tema selecto (tipos de terreno, uso de terreno, vegetación, carreteras) definidas ya como coberturas. Entre las características más útiles y más usadas de los SIG modernos está su habilidad para ubicar coberturas que se encuentran sobre otras coberturas; este recubrir coberturas con otras coberturas se conoce como superposición.

Figura 29. **Integración de las capas de un SIG**



Fuente: [www.ornl.gov/sci/landscan/landscan\\_documentation](http://www.ornl.gov/sci/landscan/landscan_documentation). Consulta: agosto de 2012.

En un SIG, colecciones homogéneas de objetos geográficos están organizadas dentro de una serie de temas de datos o capas (por ejemplo imágenes satelitales, construcciones, uso de suelo, carreteras, etc.) que cubren o proporcionan un mapa interactivo. Para mejores resultados, no sólo coberturas trabajan juntas buscando mayor entendimiento, sino que también es posible combinar todas las capacidades analíticas de un SIG para integrar un sistema operacional más complejo.

### **3.4. Aplicación de un SIG en las comunicaciones**

El empleo de los sistemas de información geográfica en comunicaciones, como se mencionó al inicio del capítulo ha llegado a ser muy útil en el diseño de enlaces, pues con un sistema de computadora se puede definir una línea de vista, presencia de obstáculos, barrancas, alturas de terreno o edificios, etc.

facilitando la búsqueda de alternativas que permitan optimizar y/o hacer viable un sistema de comunicación.

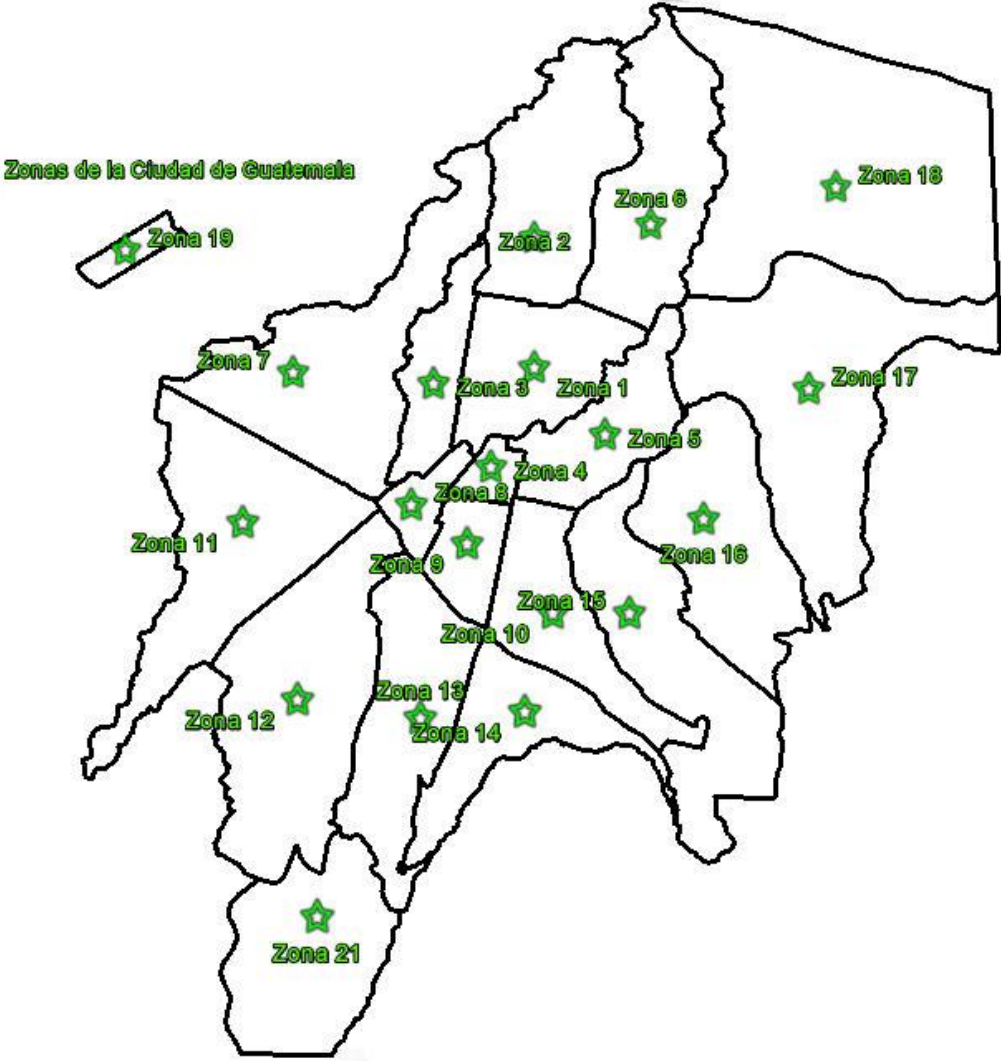
Los sistemas de información geográfica actuales permiten visualizar todos los factores que provocan la atenuación de una señal utilizando superposición de mapas que describen por separado información de alturas, localización, perfiles de terreno (lluvia, nieve, neblina), etc. que se deben considerar para el cálculo preciso de disminución de potencia.

En este trabajo, el SIG será empleado para medir distancias reales en la ciudad de Guatemala contra niveles de potencia generando áreas de cobertura; esto se logrará superponiendo manchas de coberturas obtenidos de las mediciones sobre el mapa geo referenciado de la ciudad para lograr la obtención de un modelo matemático en base a las mediciones que serán procesadas como se explica a continuación:

### **3.5. Elaboración de SIG**

Para la elaboración del SIG empleado en este trabajo se utilizaron fundamentalmente 4 capas o temas de datos: un mapa georreferenciado de la ciudad de Guatemala, una capa calles y avenidas, una capa con las mediciones obtenidas en cada uno de los diferentes escenarios y la capa donde se encuentran las estaciones base transmisoras.

Figura 30. Capa 1: mapa georreferenciado de la ciudad de Guatemala



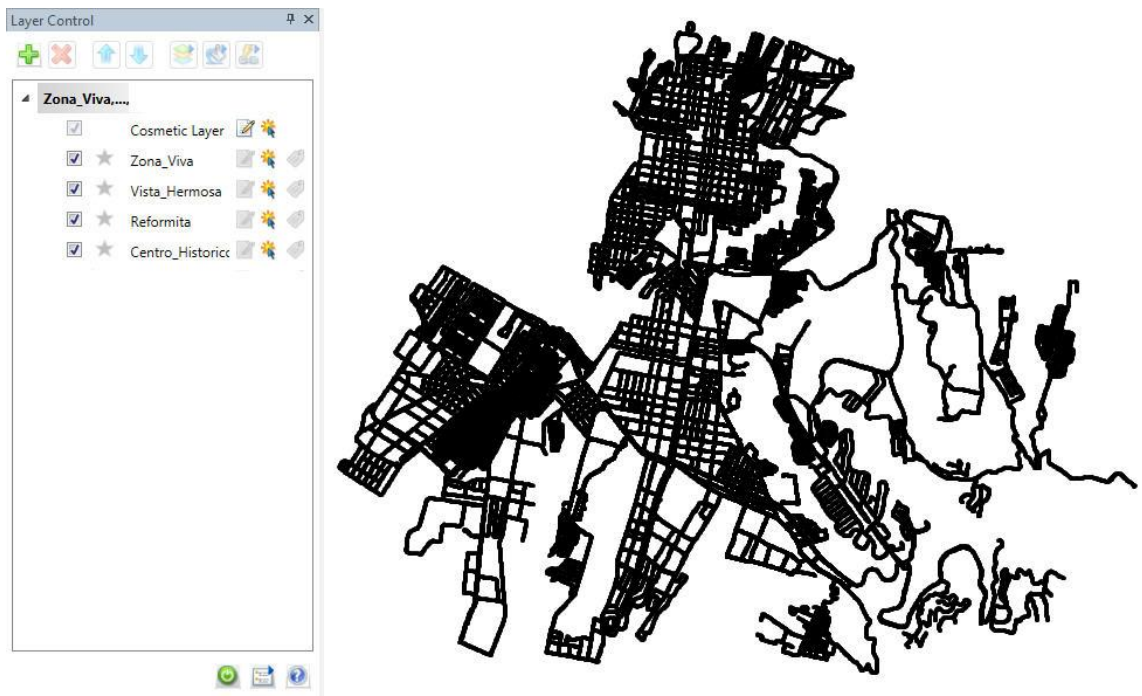
Fuente: Empresa Telecomunicaciones de Guatemala, S.A.

La primera capa o mapa georreferenciado mostrado en la figura 30 constituye mediante líneas, puntos y polígonos (representación vector) a la ciudad de Guatemala con sus respectivas zonas.

Dentro de esta primera capa, se capturaron todas las mediciones puntuales del transmisor con su respectiva ubicación o coordenada geográfica.

Las mediciones puntuales capturadas en el mapa de la ciudad de Guatemala servirán como referencia o puntos de control, con su respectivo código de color que indica el nivel de potencia.

Figura 31. **Capa 2: mediciones puntuales**



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

La tercera capa para la integración del SIG es la de los ejes, es decir, calles y avenidas de la ciudad de la ciudad de Guatemala, con el objetivo de obtener el nivel de potencia en cualquier sitio de interés.

Figura 32. Capa 3: eje, calles y avenidas

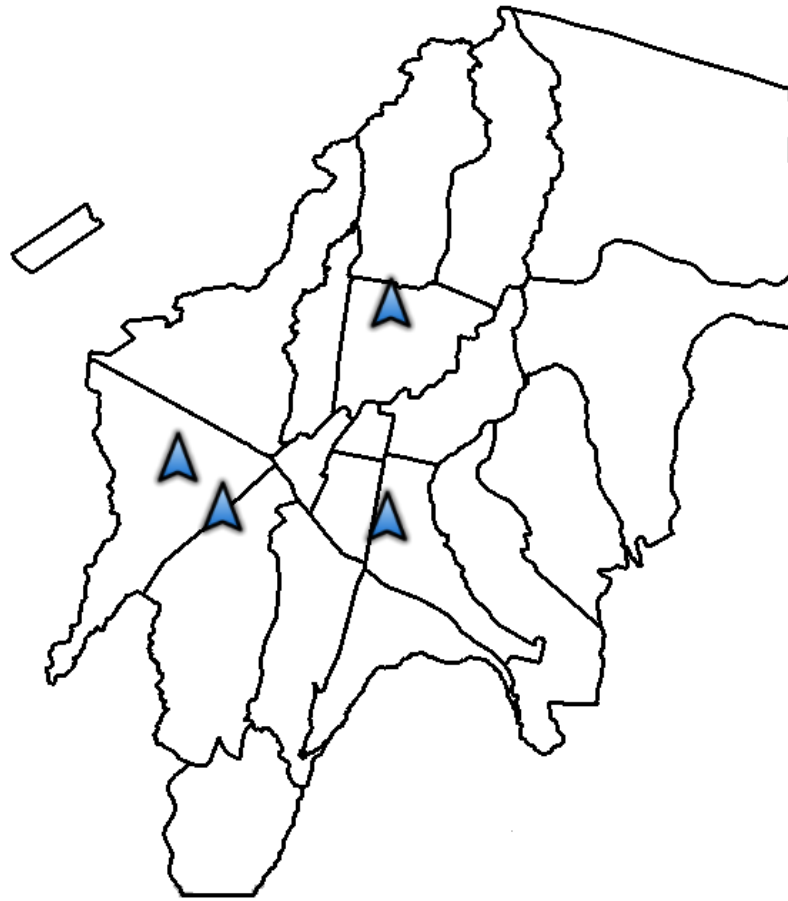


Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth y MapInfo.

La última capa corresponde a las antenas, se observa en la figura 33 que contiene o representan a las cuatro radio bases transmisoras utilizadas para este estudio, en cada uno de los diferentes escenarios.



Figura 33. **Capa 4: ubicación de las radio bases transmisoras**



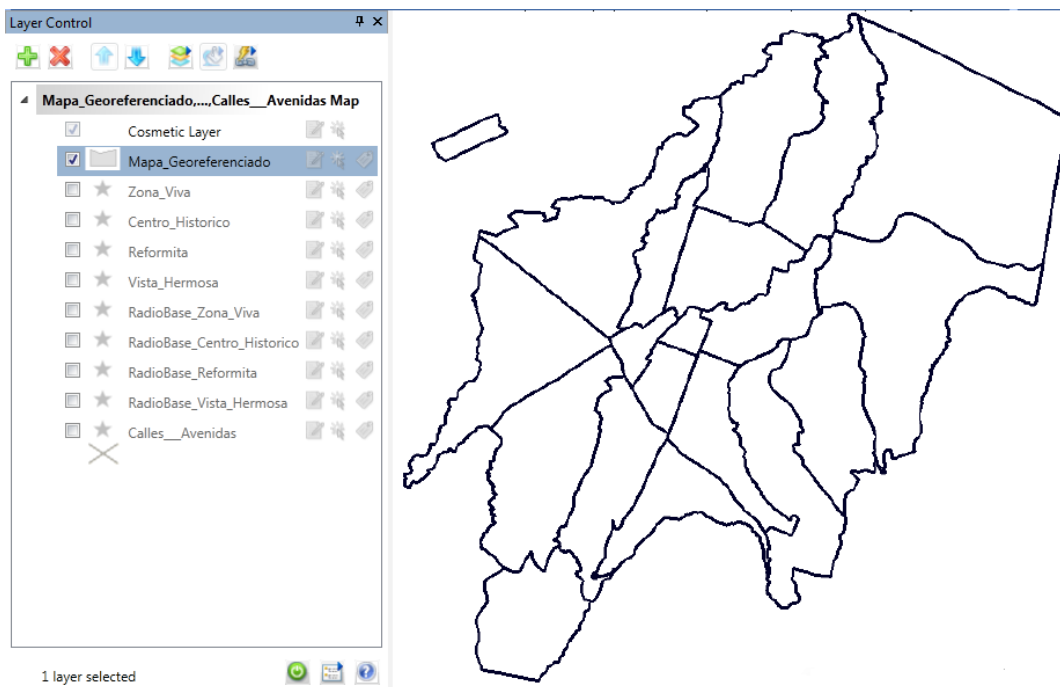
Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

### **3.5.1. Integración del SIG utilizado**

Una vez creadas las capas que conformarán al SIG utilizado, el sistema debe ser integrado para los propósitos del experimento y toma de decisiones sobre las áreas de interés, ésta integración se realiza con ayuda del software MapInfo y Google Earth.

Dentro del sistema de información geográfica de MapInfo, se puede incluir todas las capas en un solo mapa temático integrado. Una vez cargadas las capas de interesen MapInfo es necesario arrastrarlas hacia la pantalla principal del SIG para realizar la superposición de capas. Terminado el procedimiento anterior, es necesario activar cada una de las capas como se indica a continuación:

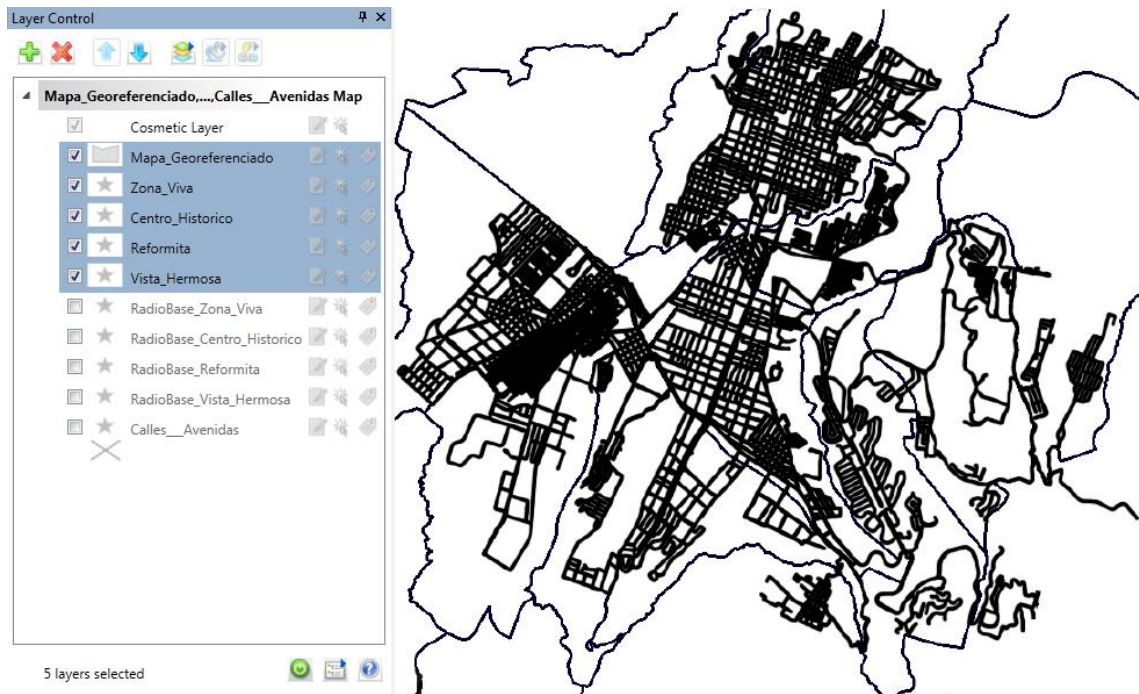
Figura 34. **Activación de la capa 1 o mapa georreferenciado**



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

La figura 34 ilustra a la primera capa activada, posteriormente se capturan las mediciones puntuales (figura 35) que servirán como puntos de control para generar el modelo correspondiente.

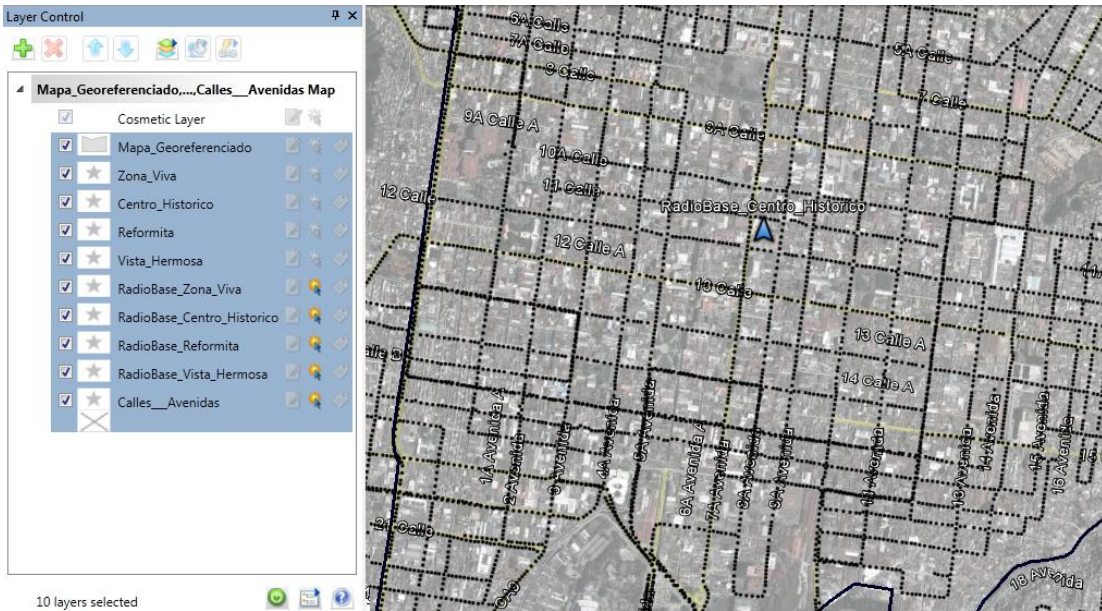
Figura 35. Mapa georreferenciado con mediciones puntuales



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

Una vez capturadas las mediciones sobre el mapa georreferenciado, ahora se agrega la capa con la localización de los cuatro transmisores, así como también la capa de avenidas y calles de la ciudad de Guatemala para su visualización.

Figura 36. Visualización de las cuatro capas

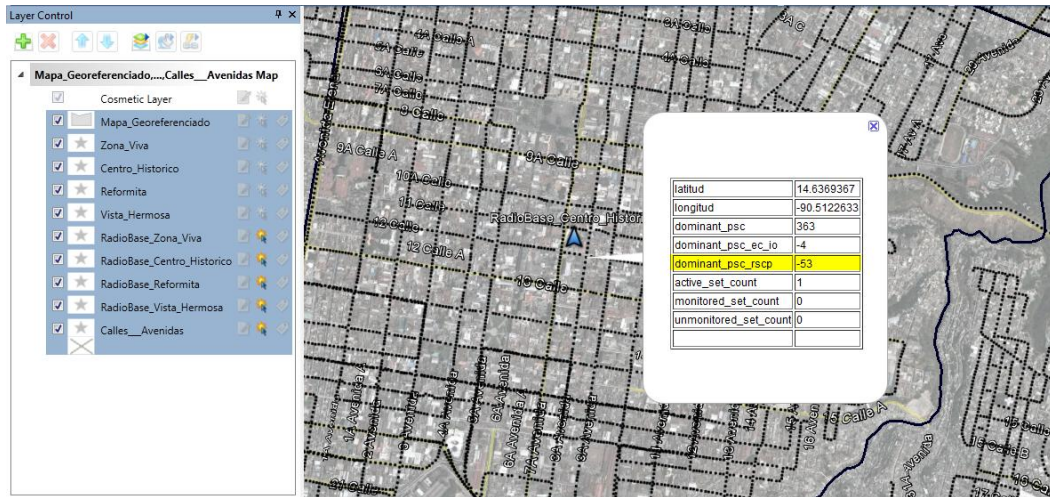


Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo y Google Earth.

La integración completa del SIG empleado se muestra en la figura 36 con cada una de las capas descritas anteriormente, haciendo posible el análisis de niveles de potencia sobre porciones específicas de terreno alrededor de las estaciones base que conforman el sistema utilizado.

Una de las características principales por las cuales se utilizó el sistema de información geográfica es que proporcionan el atributo de realizar el acercamiento deseado para encontrar la potencia de recepción calle por calle, avenida por avenida, tal como se observa en la figura 37.

Figura 37. Datos de una muestra para un punto específico



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo y Google Earth.



## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Sujeto a investigar**

Los sujetos de investigación son las distintas morfologías de construcción existentes en la ciudad de Guatemala. Las diferentes morfologías que se describe a continuación, fueron detectadas por medio de visitas de campo en la ciudad así como también por medio de fotos satelitales.

La peculiaridad de la ciudad de Guatemala se da debido las diferentes distribuciones de las edificaciones, la arquitectura variada y especialmente los materiales de construcción hacen que sea muy variada.

Una vez identificada esta morfología, las características de cada una de ellas se determina por medio de mediciones de campo en distintos escenarios pertenecientes a cada una de ellas.

### **4.2. Clasificación de entornos**

Se ha descrito los efectos de propagación que influyen en la señal en un sistema de comunicaciones móviles. Las características de propagación están influenciadas por las características del terreno, que puede clasificarse como llano, ondulado o muy montañoso. También depende de la zona donde se desea proporcionar servicio: entornos rurales, urbanos, suburbanos o interiores de edificios. Finalmente, la variación de las condiciones de propagación depende tanto de la velocidad de desplazamiento del terminal como de la variación de los objetos que lo rodean.

En función de los parámetros que sean comentado existen diversas clasificaciones que agrupan los entornos en función de unas u otras características. Esta distinción se basa tanto en la diferente configuración de los objetos entre las dos antenas (paredes, esquinas, suelos, montañas, edificios, vegetación, etc.) como en el comportamiento dinámico del terminal móvil (grado de movilidad, giro en esquinas, etc.). Generalmente la primera división que se realiza es la diferenciación entre entornos de exteriores e interiores de edificios.

En los entornos de comunicaciones exteriores la distancia entre la antena emisora y la receptora puede variar entre centenares de metros a decenas de kilómetros. Además, pueden estar situadas en ciudades, en el centro o el extrarradio, en zonas suburbanas o en el campo, en zonas llanas o montañosas.

Finalmente la velocidad de los terminales puede superar el centenar de kilómetros por hora. Por otro lado, en los sistemas instalados en el interior de edificios, la distancia entre las antenas es como máximo de un centenar de metros, pero existen múltiples paredes y obstáculos que se interponen entre ellas de materiales que atenúan la señal con valores distintos.

Además, la velocidad de desplazamiento tanto del móvil como de los objetos que lo circundan son reducidas (típicamente del orden de algún km/h). Según ello, cada uno de los entornos tendrá unas características comunes. A continuación se muestra una clasificación de los entornos de propagación y los parámetros que los caracterizan.



#### **4.2.1. Entorno urbano denso**

Esta morfología se caracteriza por estar constituida por grandes estructuras de concreto. Los edificios poseen en promedio más de 40 mts de altura, las áreas entre edificios son pequeñas en comparación a su altura. Morfologías de este tipo pueden ser identificadas en ciudades como Nueva York, Tokio, Houston, Chicago, entre otras.

Al analizar la base de datos morfológica de la ciudad de Guatemala, no se ubica ninguna región con este tipo de morfología. Por esta razón este tipo de morfología ha quedado fuera de los sujetos de medición a analizar en este estudio de propagación.

#### **4.2.2. Entorno industrial comercial**

Este tipo de morfología de construcción posee varias características, lo cual permite que sea subdividida en las categorías descritas a continuación:

##### **4.2.2.1. Edificios menores a cinco niveles**

Esta morfología se caracteriza por estar definida por edificios de mediano tamaño, con una altura promedio de 16 mts, ubicados sobre terrenos con un área promedio de 500 mts<sup>2</sup> cuadrados. Su principal material de construcción es el concreto y vidrio. Las calles poseen un ancho promedio de 10 mts.

##### **4.2.2.2. Edificios mayores a cinco niveles**

Morfología con construcción de gran tamaño, poseen una altura promedio de 40 mts. Se ubica sobre terrenos con un área promedio de 2,250 mts<sup>2</sup>. Su

principal material de construcción es el concreto y el vidrio. Las calles poseen un ancho promedio de 10 mts.

#### **4.2.2.3. Área industrial**

Se caracteriza por ser estructuras con áreas de construcción grandes pero con una altura mediana. Poseen una altura mediana. Posee una altura promedio de 10 mts, edificados sobre terrenos con un área promedio de 7,200 mts<sup>2</sup>.

Por lo general, se construye de concreto con techo de polímero y materiales aislantes. Poseen grandes áreas de acceso y lotes de parqueo, por lo cual se encuentran alejados entre sí. Este tipo de edificación se utiliza por lo general para propósitos comerciales o industriales, aunque algunas se utilizan para vivienda.

#### **4.2.3. Entorno residencial denso**

Este tipo de morfología define viviendas de pequeño tamaño con un reducido espacio entre ellas.

Son edificaciones sobre terrenos con un área promedio de 160 mts<sup>2</sup>, su altura promedio es de 3 mts. por nivel. En general, los materiales de construcción son paredes de concreto en un 90% y adobe en un 10%. Dos terceras partes de las casas poseen techo fundido, el resto posee techo de lámina. Por lo general no poseen área de patio ni de jardín.

#### **4.2.4. Entorno residencial no denso**

Morfología definida por viviendas amplias con áreas para jardín y patio, por lo general los espacios entre construcciones son amplios. Edificadas sobre terrenos con un área promedio de  $500 \text{ mts}^2$  con una altura promedio de  $3 \text{ mts.}$  de altura por nivel. Poseen por lo general una ocurrencia de 30% para casas de un nivel y un 70% para casas de dos niveles, se construyen por lo general con paredes de concreto y techo fundido.

#### **4.3. Variables a medir**

Las variables de propagación que se midieron para este estudio son las siguientes:

##### **4.3.1. Potencia de código de señal recibida**

La Potencia de código de señal recibida (RSCP, por sus siglas en inglés, Received Signal Code Power), es una medición de la magnitud de potencia de recepción de una estación móvil en un sistema de comunicación inalámbrica. Se utilizado como un indicador de intensidad de señal, en el enlace descendente de control de potencia así como el enlace ascendente y para el cálculo de pérdida en la trayectoria.

El nivel de potencia a medir en este estudio, corresponde a la frecuencia de espectro de comunicaciones móviles, ubicado en los 1943.5 Mhz .

### 4.3.2. Margen de desvanecimiento

El nivel de RSCP en un sistema receptor experimentara como consecuencia de las múltiples trayectorias de propagación de la onda, un desvanecimiento alrededor de un valor central, independientemente de que su posición sea la misma. Pudiendo ser este desvanecimiento de término corto o extenso.

Debido a su gran importancia en nuestro modelo de propagación, se midió este valor por métodos estadísticos a partir de los datos obtenidos en cada uno de los diferentes escenarios para nuestro estudio.

### 4.4. Definición de indicadores

Las variables a medir poseen una magnitud en decibeles (dB), esta dimensional logarítmica fue introducida en el estudio de los fenómenos de frecuencias eléctricas por Hendrik Wade Bode. Dada la función

$$G(j\omega) = M(\omega) e^{j\phi(\omega)} \quad 4.1$$

Cuya representación compleja viene dada por

$$\ln G(j\omega) = \ln M(\omega) + j\phi(\omega) \quad 4.2$$

En la ecuación anterior,  $\ln G(j\omega)$  es la ganancia o la ganancia logarítmica de neper, y  $\phi$  es la función de ángulo en radianes. Esta unidad dada en decibeles (dB) es

$$\text{Ganancia en decibeles} = 20 * \log M(\omega) \quad 4.3$$

Para el estudio,  $M(\omega)$  representa la diferencia del nivel recepción en un escenario interior respecto a un escenario exterior.

#### **4.5. Muestra**

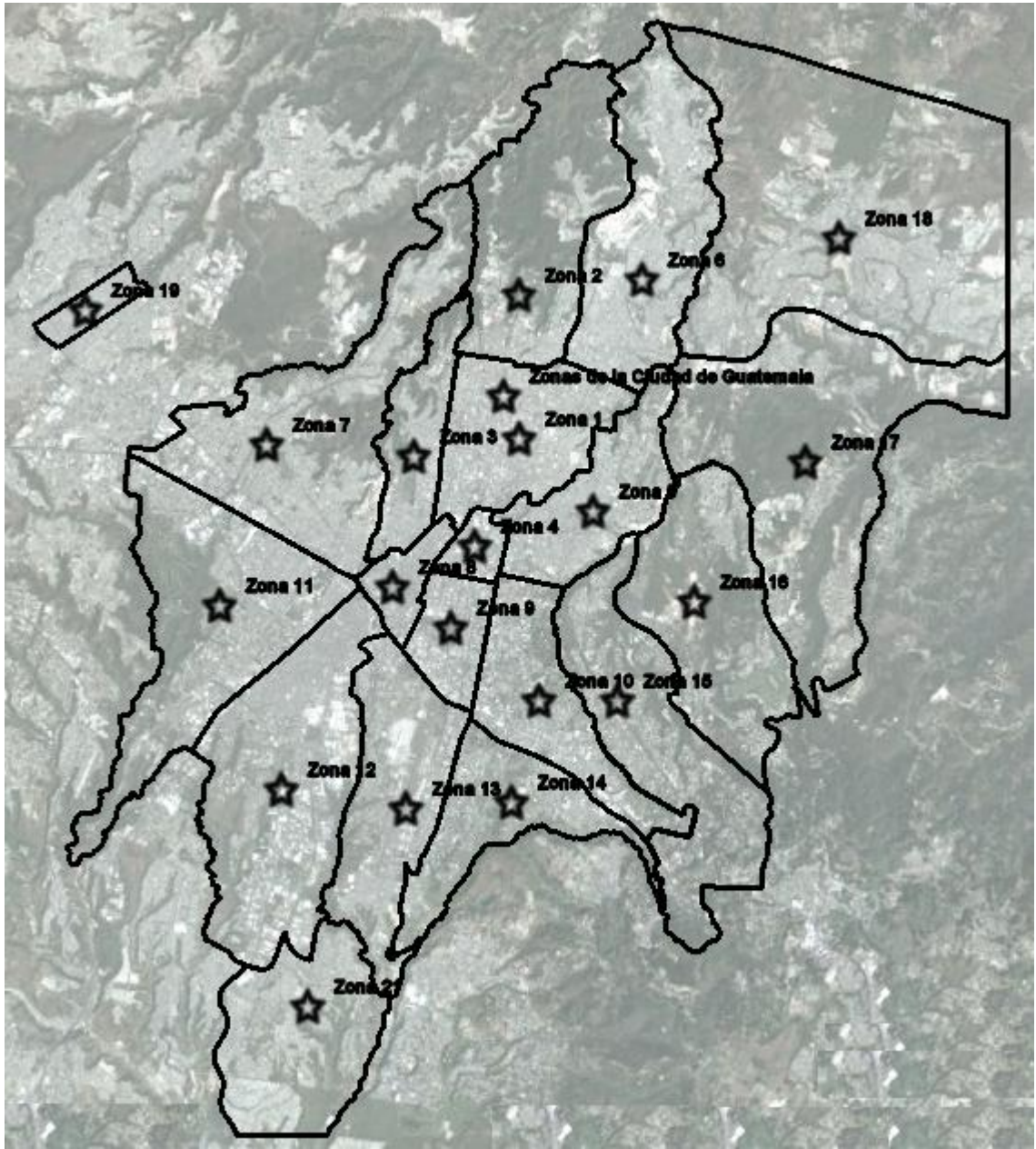
La muestra se estableció a partir de la clasificación realizada en la base de datos, de acuerdo a las fotos satelitales y visitas de campo realizadas en la ciudad de Guatemala.

Esto permite identificar gráficamente las zonas que poseen cada uno de los diferentes entornos de morfología de la ciudad, así como establecer las áreas a utilizar como muestras sobre la base de los lugares donde un determinado tipo de entorno morfológico es predominante.

Debido a que en la ciudad de Guatemala existen diferentes tipos de entornos morfológicos, los cuales se analizan por separado, se analiza cada uno de los datos obtenidos en los diferentes recorridos.

Los diferentes zona de la ciudad de Guatemala, se muestran en la figura 38.

Figura 38. Entorno morfológico de la ciudad de Guatemala por zonas



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo y Google Earth.

Las áreas predominantes por los diferentes entornos morfológicos fueron las enumeradas a continuación:

#### **4.5.1. Urbana densa**

Este entorno morfológico predomina en

- Avenida Reforma, zona 9 y 10
- Avenida Las Américas, zona 13 y 14
- Boulevard Los Próceres, zona 10
- Diagonal 6, zona 10

#### **4.5.2. Industrial comercial**

Morfología predominante en

- Centro Histórico, zona 1
- Intersección Anillo Periférico y Calzada Roosevelt
- Centro Cívico, zona 4
- Vista Hermosa, zona 15
- Calle Montúfar, zona 9

#### **4.5.3. Residencial denso**

Entorno morfológico predominante en las áreas ubicadas en

- Calle Martí, zona
- Avenida Bolívar, zona 8
- Colonia la Reformita, zona 12
- Colonia Landívar, zona 7
- Colonia La Florida, zona 19
- Colonia Montserrat, zona 19

- Avenida Elena y 20 calle, zona 3
- Colonia Roosevelt, zona 11
- Colonia Carabanchel, zona 11

#### **4.5.4. Residencial no denso**

Este tipo de morfológica predomina en las áreas ubicadas en

- Boulevard Los Próceres, zona 14
- Vista Hermosa, zona 15
- Colonia Mariscal, zona 11
- Avenida Las Américas, zona 13
- Avenida Petapa, zona 12

#### **4.6. Equipo de medición**

El equipo necesario para realizar este estudio, consistió de un sistema transmisor y un sistema receptor, el cual mide el nivel de señal recibida. El equipo utilizado fue configurado para transmitir la frecuencia central de 1943.5 Mhz, lo constituye una radio base operando a esta frecuencia. La radio base consta de en general de un microprocesador de control, una etapa de adquisición de datos, una etapa de transmisión de radio frecuencia y una interface para integrarse a un sistema.

Las mediciones se obtuvieron mediante *drive test* en la banda de 1900 MHz, específicamente en la frecuencia de 1943.5 MHz. Las mediciones fueron realizadas con un equipo diseñado para mediciones de cobertura celular (LCC – RSAT 2000). El instrumento de medición se encuentra instalado en un vehículo



y cuenta con un sistema de navegación para reportar en una computadora portátil tanto los niveles de señal medidos como la posición.

El scanner utilizado cumple con el criterio de Lee, el cual postula que el nivel de señal medido debe promediarse cada una distancia de entre 20 y 40 longitudes de onda con una cantidad de entre 36 y 50 muestras. El promediado de la señal se utiliza para independizar la medición de desvanecimientos rápidos producidos por el múltiple camino y obtener de esta manera la media local. Midiendo en 1900 MHz el criterio de Lee nos obligaría a tener una muestra, como máximo, cada 15 mts, en general, en las pruebas de campo realizadas en telefonía celular se recorren varios centenares de kilómetros y se miden gran cantidad de frecuencias a la vez, para el estudio únicamente se medirá una frecuencia.

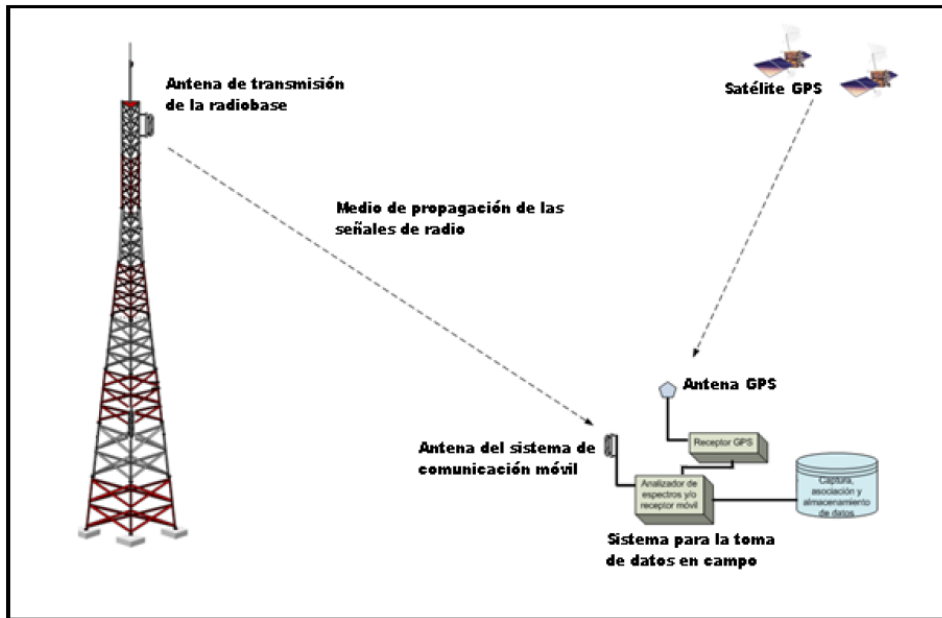
Los equipos de medición cumplen el criterio de Lee pero además realizan un promedio sobre las muestras obtenidas con dicho criterio; de otra manera sería muy difícil la tarea de procesamiento de las mediciones debido a su gran tamaño.

Para todas las mediciones se utiliza como antena transmisora (estación base) una antena omnidireccional modelo ASPP2936E fabricada por Andrew Corporation – datos técnicos en el anexo A - montada sobre un pedestal portátil en terrazas de edificios o arriostrada y un equipo transmisor de RF de 20 Watts produciendo una portadora modulada de ancho de banda 30 kHz, las pérdidas del alimentador hacia la antena son 2 dB.

El equipo de medición cuenta con antenas montadas sobre el techo del vehículo, aproximadamente 1,8 mts de altura, con una ganancia total entre antena y cable hasta el equipo de 0 dB. Para todas las muestras obtenidas se

calcula la distancia desde la ubicación de la antena y se ajustan los valores medidos con la ganancia de la antena en esa dirección.

Figura 39. Diagrama de sistema de comunicación utilizado

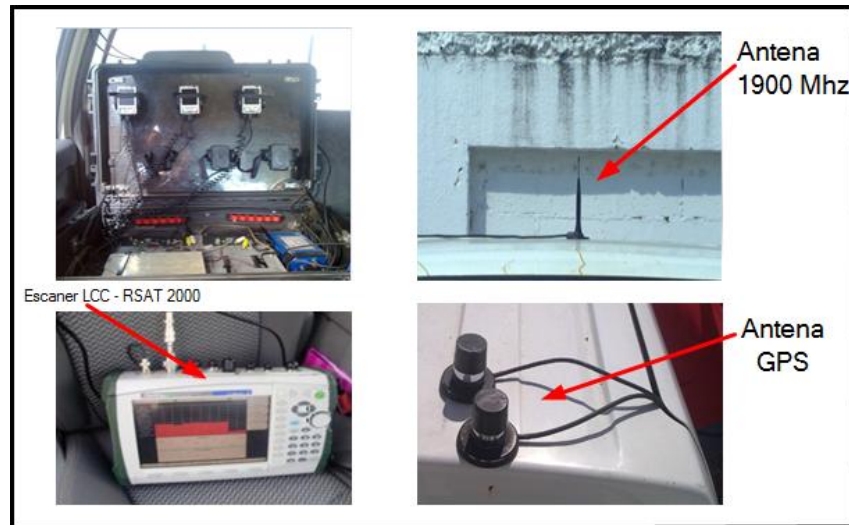


Fuente: [www.komova.net/paginas-web-para-moviles-\(wap\)](http://www.komova.net/paginas-web-para-moviles-(wap)). Consulta: septiembre de 2012.

#### 4.7. Montaje del equipo de medición

Sobre el techo del vehículo se montaron las antenas receptora y la antena GPS, que se conectaran al equipo de medición como se muestra en la figura 40. La función de la antena receptora es la recepción potencia transmitida, mientras que la antena GPS proporciona la ubicación geográfica del móvil, de esta manera se obtienen los niveles de señal del trasmisor instalado en una posición específica en la ciudad de Guatemala.

Figura 40. **Montaje del equipo de medición**



Fuente: elaboración propia, con programa HyperSnap 6.

#### **4.8. Proceso de medición**

El procedimiento seguido para la medición de las variables, consistió en la identificación de cada uno de los distintos escenarios específicos, mencionados anteriormente, con características pertenecientes a los distintos entornos morfológicos existentes en la ciudad de Guatemala.

##### **4.8.1. Mediciones realizadas**

A continuación se presentan las mediciones realizadas en cada uno de los diferentes escenarios, georreferenciando las muestras en un mapa, con la ayuda del software MapInfo.

#### 4.8.1.1. Primer escenario de medición: Zona Viva

Zona: urbana densa, gran densidad de edificios altos.

Altura promedio de edificación 40 mts.

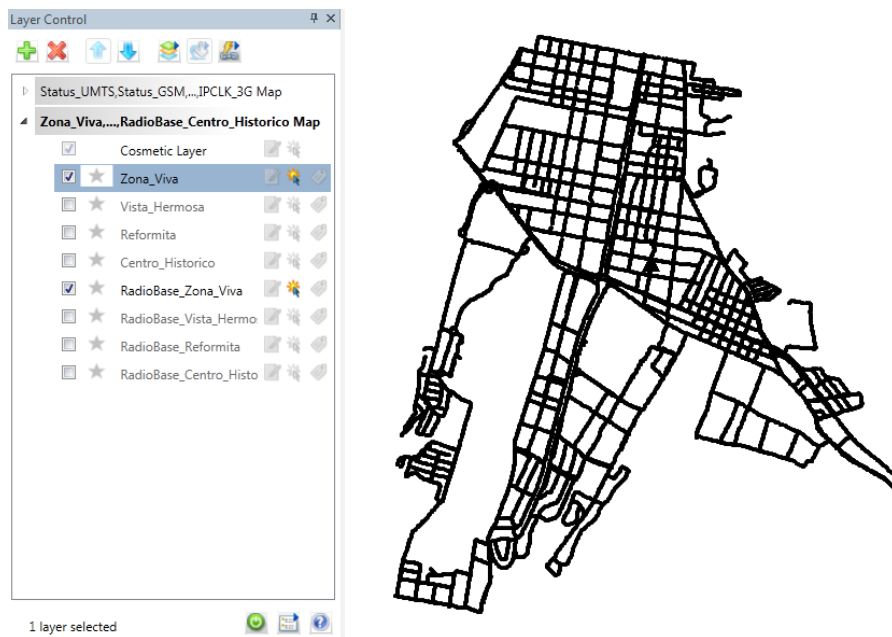
Gran densidad de edificios

Coordenadas: 14°35'46.36"N  
-90°30'48.44"O

Altura de antena: 45 mts.

En la figura 41 se puede ver el camino recorrido y los niveles de señal en dBm medidos.

Figura 41. Mediciones tomadas alrededor de radio base Zona Viva



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

#### 4.8.1.2. Segundo escenario de medición: Centro Histórico.

Zona: industrial comercial.

Altura promedio de edificación 30 mts.

Densidad de construcciones de altura media.

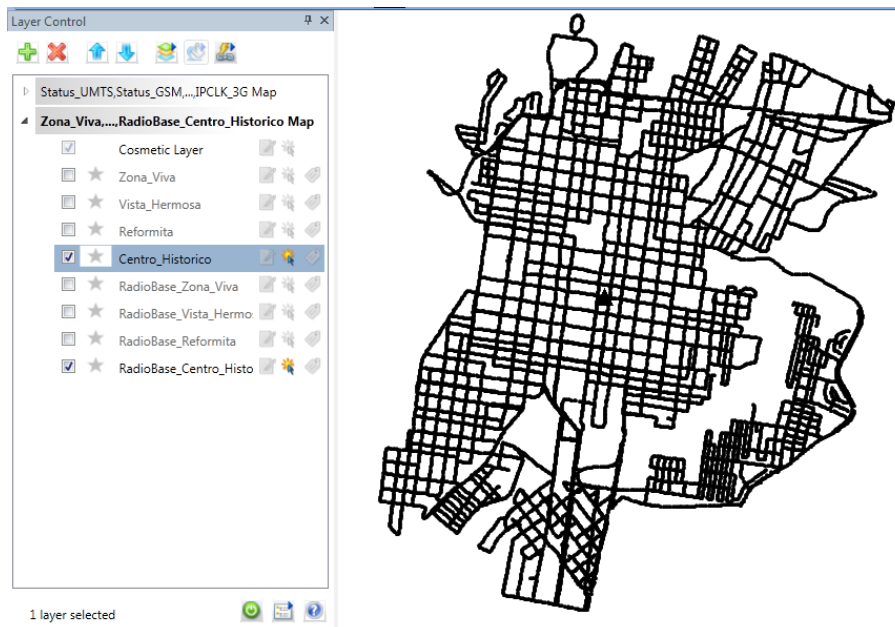
Coordenadas: 14°38'13.56"N

-90°30'45.72"O

Altura de antena: 38 mts.

En la figura 42 se puede ver el camino recorrido y los niveles de señal en dBm medidos.

Figura 42. Mediciones tomadas alrededor de radio base Centro Histórico



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

### 4.8.1.3. Tercer escenario de medición: Reformita

Zona: residencial denso

Altura promedio de edificación 22 mts.

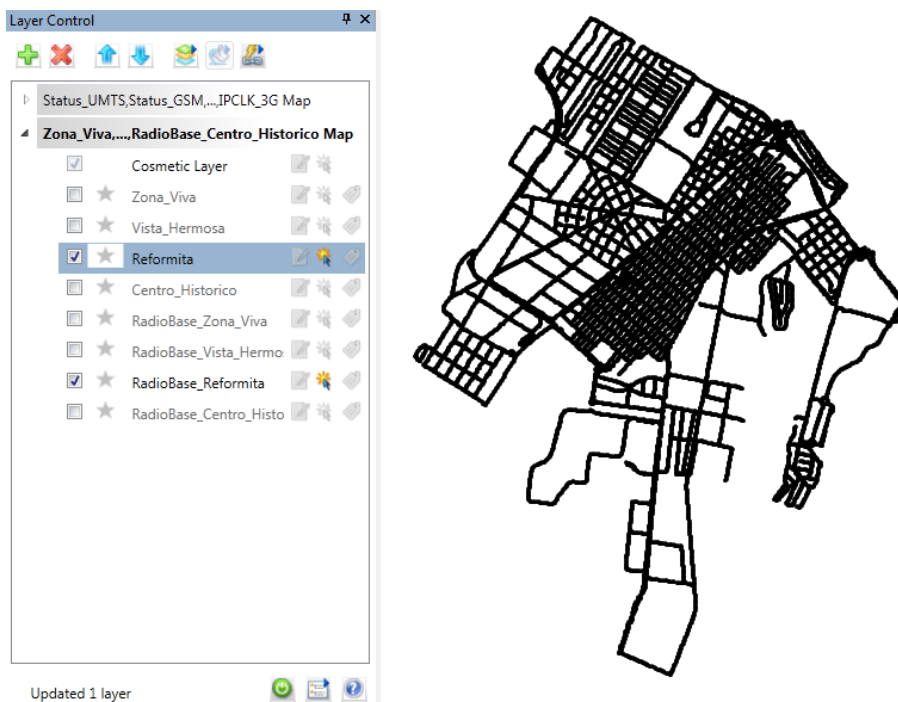
Construcciones de mediana altura.

Coordenadas: 14°36'03.00"N  
-90°32'55.00"O

Altura de antena: 36 mts.

En la figura 43 se puede ver el camino recorrido y los niveles de señal en dBm medidos.

Figura 43. Mediciones tomadas alrededor de radio base Reformita



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

#### 4.8.1.4. Cuarto escenario de medición: Vista Hermosa

Zona: residencial no denso

Altura promedio de edificación 24 mts.

Construcciones de mediana altura.

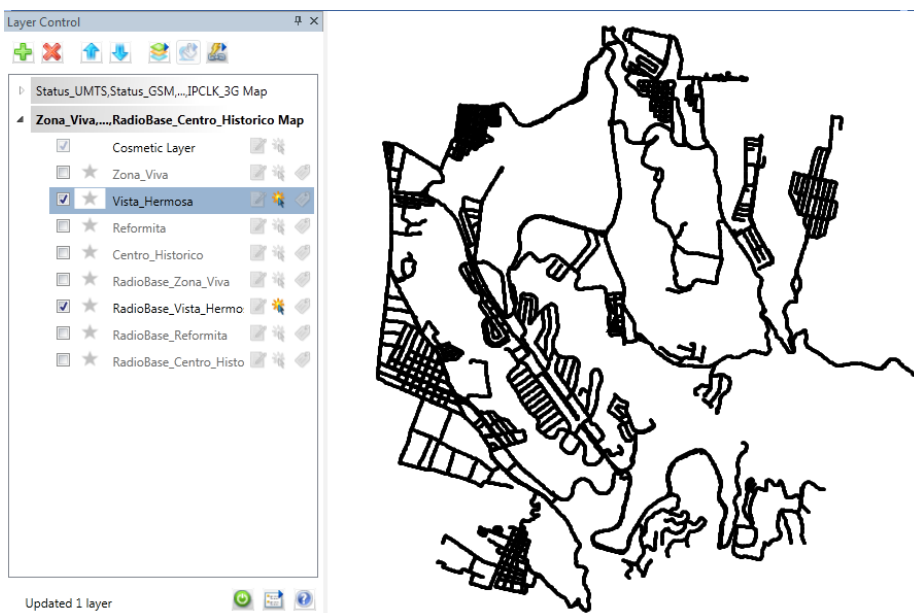
Coordenadas: 14°35'43.32"N

-90°29'05.82"O

Altura de antena: 36 mts.

En la figura 44 se puede ver el camino recorrido y los niveles de señal en dBm medidos.

Figura 44. Mediciones tomadas alrededor de radio base Vista Hermosa



Fuente: elaboración propia, con programa MapInfo.

#### **4.9. Análisis numérico y estadístico de los datos tomados en campo**

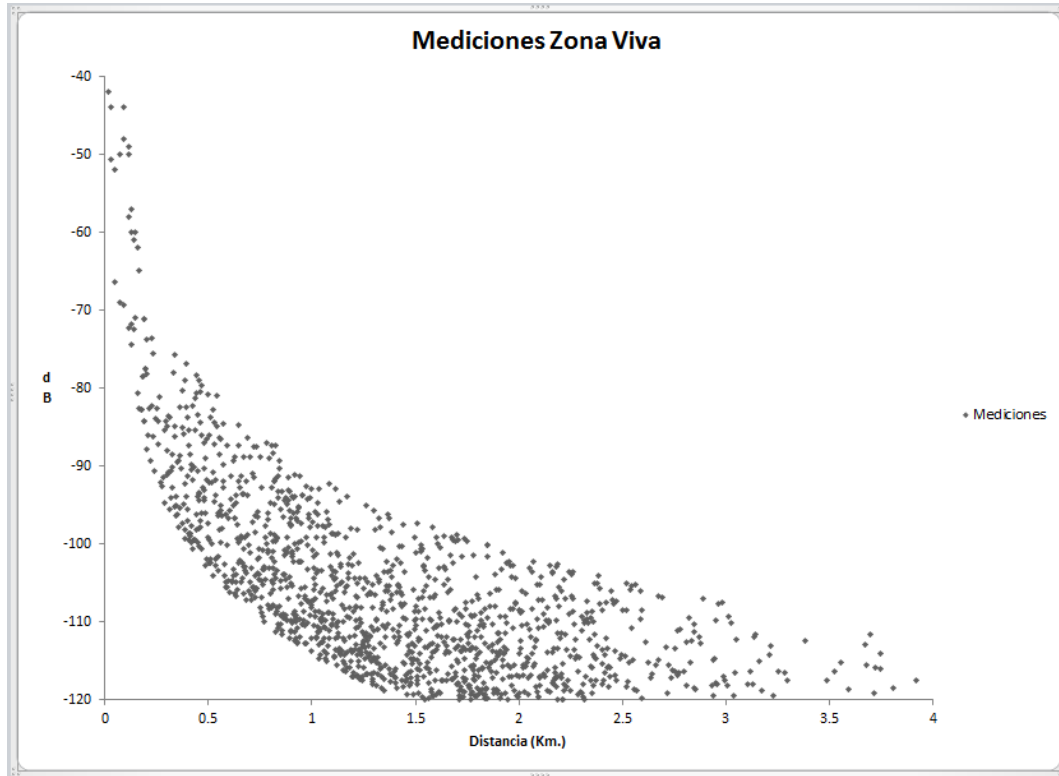
El modelo propuesto es un modelo estadístico con mediciones hechas en la ciudad de Guatemala. Para el desarrollo de cada uno de los modelos, de acuerdo a la clasificación realizada, se inició ordenando todos los valores medidos de nivel de potencia recibida en el móvil según la distancia a la que se encontraba del transmisor. A continuación se explica el método utilizado:

Para poder encontrar la distancia entre el transmisor y el receptor, se utilizaron las coordenadas obtenidas a través de GPS, las mismas se tiene como Latitud y Longitud para cada muestra, sin embargo, las mismas se encuentran en coordenadas esféricas, se debe de encontrar el arco que separa tanto al trasmisor como a cada muestra, para facilitararlo se decidió realizar la conversión de dichas coordenadas a coordenadas Cartesianas. Encontrando así por medio del teorema de Pitágoras generalizado a tres dimensiones la distancia requerida.

A continuación se grafica el nivel de señal de cada muestra respecto a la distancia del trasmisor, correspondiente a cada uno de los escenarios en estudio.

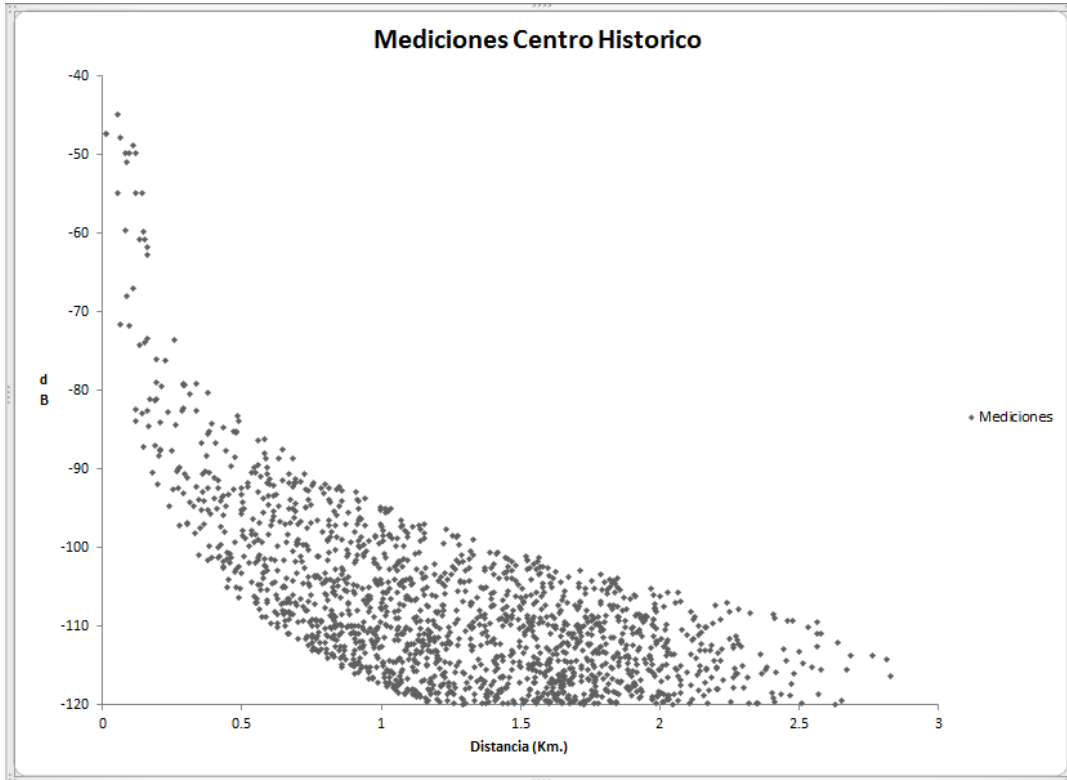


Figura 45. Nivel de señal Vs. distancia, Zona Viva



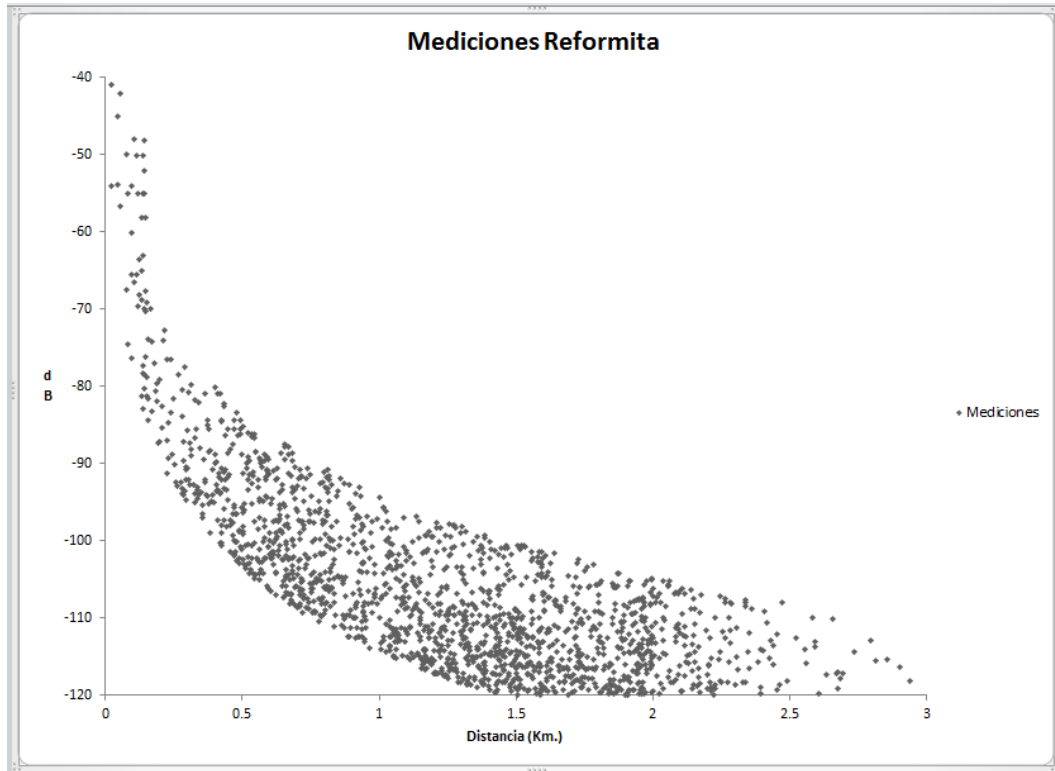
Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 46. Nivel de señal Vs. distancia, Centro Histórico



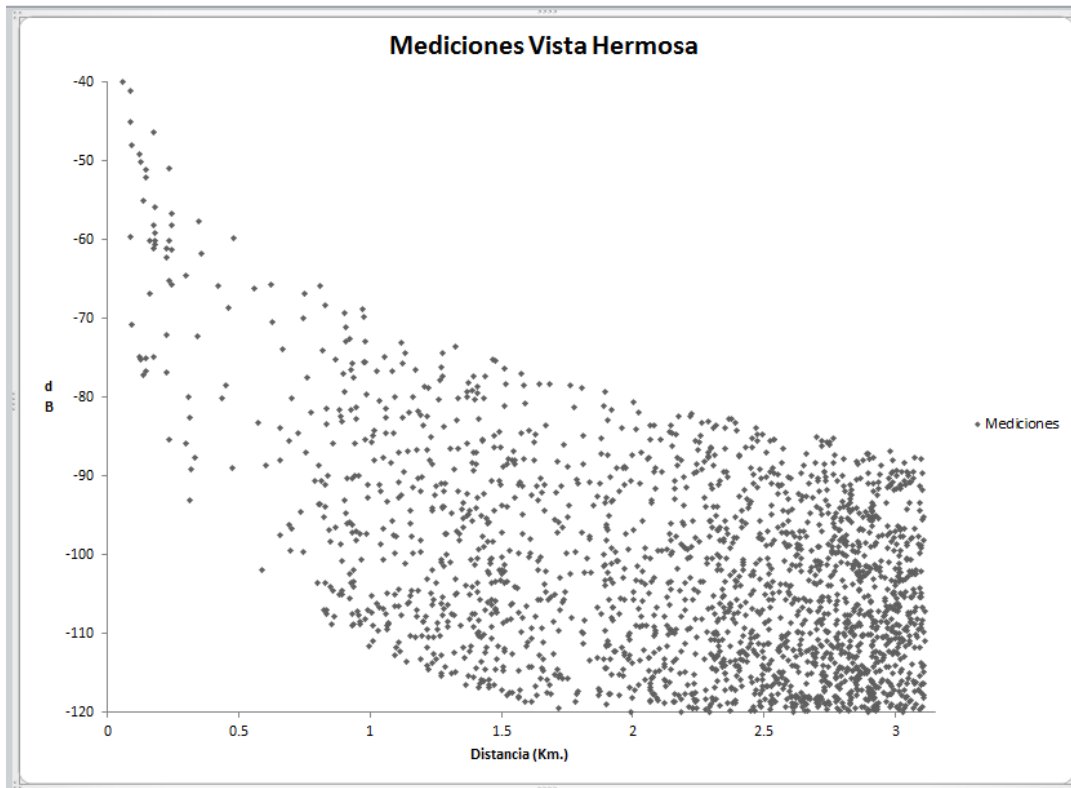
Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 47. Nivel de señal Vs. distancia, Reformita



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 48. Nivel de señal Vs. distancia, Vista Hermosa



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Se han eliminado los valores con un nivel de señal inferior a  $-120$  dB, esto debido a que estos niveles de señal no son tan confiables con el equipo utilizado para realizar las mediciones en campo.

Como se observa en las gráficas, se tiene un comportamiento logarítmico, debido a esto, se modelará en base a una regresión logarítmica para describir las pérdidas en cada una de las diferentes morfologías en estudio.

Con las muestras recolectadas se calcula la pérdida de potencia que hay entre un punto debajo de la antena del transmisor y otro a las diferentes

distancias. A estos datos se le realiza una regresión logarítmica para ajustar un valor medio estimado para cada distancia, el cual será de la forma:

$$L = a \ln(d) + b \quad 4.4$$

Dónde:

L: Pérdida de potencias  $d\beta_m$

d: Distancia km

Utilizando el método de mínimos cuadrados, para encontrar el valor de los coeficientes a & b de nuestra ecuación, se tiene:

$$a = \frac{\ln d * L - L \ln(d)}{\ln(d)^2 - \ln(d) \ln(x)} \quad 4.5$$

$$b = L - a * \ln d \quad 4.6$$

Utilizando una tabla de Excel para encontrar todas las sumatorias y promedios, necesarios para encontrar los coeficientes para el primero escenario Zona Viva, se tiene:

Tabla IV. **Muestras recolectadas en escenario Zona Viva**

<i>d</i>	<i>L</i>	<i>ln(d)</i>	<i>(ln(d))<sup>2</sup></i>	<i>ln(d) * L</i>	<i>L<sup>2</sup></i>
0.006305066	-29.46759745	-5.066401834	25.66842754	149.2946897	868.3392993
0.015640055	-42.93644101	-4.157920004	17.28829876	178.526287	1843.537967
0.016659692	-40.87677162	-4.094763127	16.76708506	167.3806972	1670.910458
0.02728821	-58.24076739	-3.601300545	12.96936562	209.7425073	3391.986986
0.028226569	-44.37945579	-3.567491571	12.72699611	158.3233344	1969.536096
0.02947701	-47.63488463	-3.524144631	12.41959538	167.8722229	2269.082234
0.029510087	-59.18402984	-3.523023135	12.41169201	208.5067063	3502.749388
⋮					
⋮					
⋮					
3.930950481	-118.7376984	1.368881249	1.873835875	-162.5378089	14098.64102
3.968647323	-120.0695249	1.378425312	1.900056341	-165.5068723	14416.6908
3.988581538	-120.2947441	1.383435663	1.913894235	-166.4200391	14470.82546
4.011854749	-118.9888261	1.389253665	1.930025747	-165.3056627	14158.34073
4.016643122	-112.7646563	1.390446509	1.933341496	-156.7932228	12715.86772
4.021520134	-113.2776852	1.391659974	1.936717483	-157.6440204	12831.83397
4.02300261	-115.2179717	1.392028542	1.937743461	-160.3867052	13275.18101
4.028348777	-113.9254161	1.393356559	1.941442501	-158.7387258	12979.00044
<b>∑ 11386.57</b>	<b>∑ -866231.82</b>	<b>∑ 1377.46</b>	<b>∑ 3520.61</b>	<b>∑ -190427.57</b>	<b>∑ 92870856.73</b>

Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Aplicando los valores de la tabla en las ecuaciones para encontrar los coeficientes para la regresión logarítmica, se tiene:

$$a = \frac{-190427.57 - (-106.14) \cdot 1377.46}{3520.61 - 0.17 \cdot 1377.46} \quad 4.7$$

$$a = -13.45 \quad 4.8$$

Encontrado el valor de a, se sigue con el cálculo de b

$$b = -106.14 - (-13.45) \cdot 0.17 \quad 4.9$$

$$b = -103.87 \quad 4.10$$

El resultado de aplicar la regresión logarítmica a estos datos medidos en el escenario Zona Viva, es como sigue:

$$L = -13.45 * \ln d - 103.87 \quad 4.11$$

Al aplicar el mismo procedimiento para cada uno de los demás escenarios, se obtiene:

- Zona Viva

$$L = -13.45 * \ln d - 103.87 \quad 4.11$$

- Centro Histórico

$$L = -12.62 * \ln d - 106.8 \quad 4.12$$

- Reformita

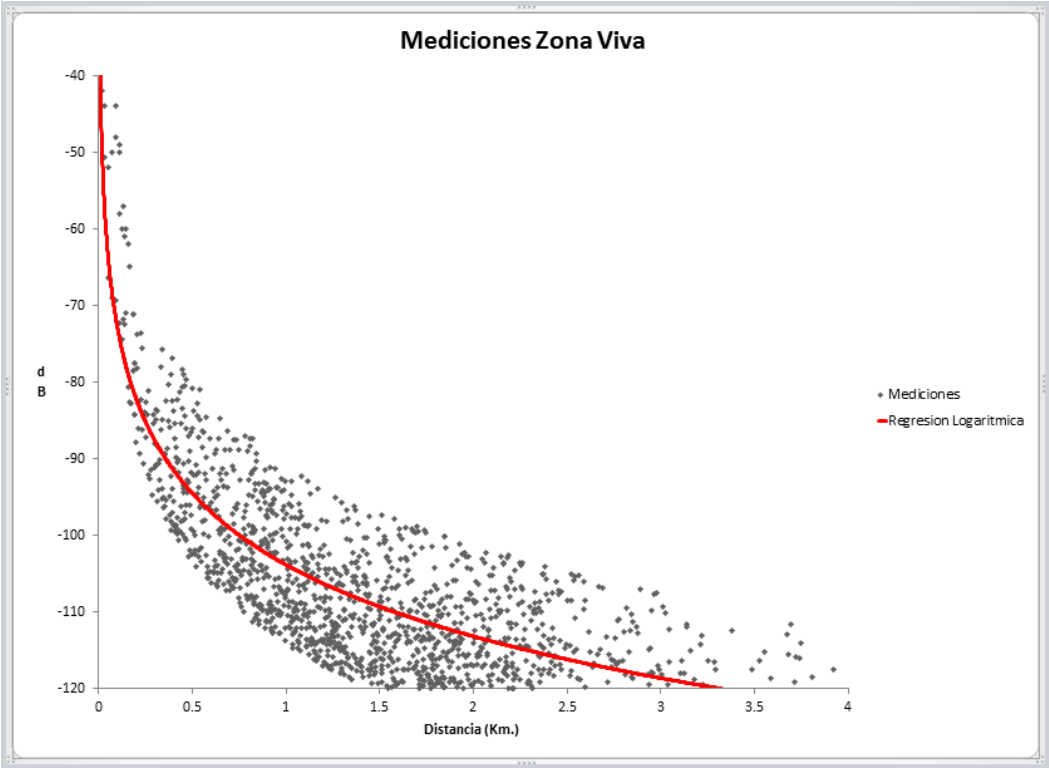
$$L = -14.27 * \ln d - 105.63 \quad 4.13$$

- Vista Hermosa

$$L = -16.86 * \ln d - 93.67 \quad 4.14$$

La visualización de la formulación desarrollada, sobre los puntos con los valores medidos, con cada uno de los diferentes escenarios se presenta en las siguientes gráficas:

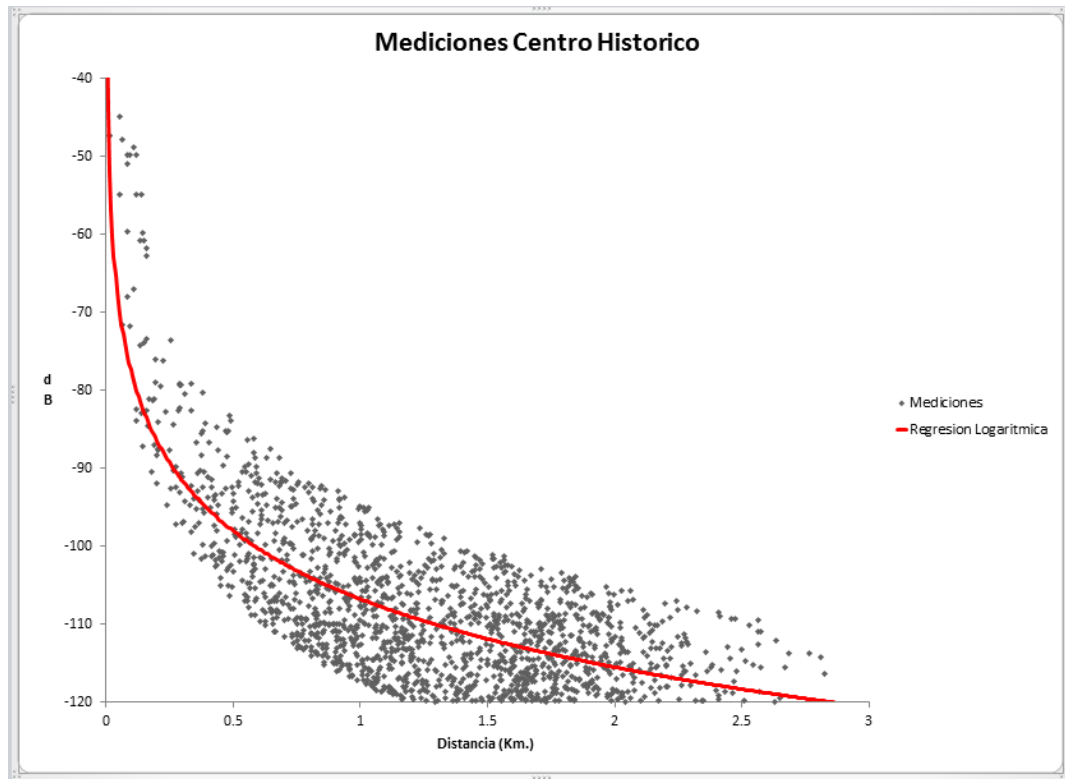
Figura 49. Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Zona Viva



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

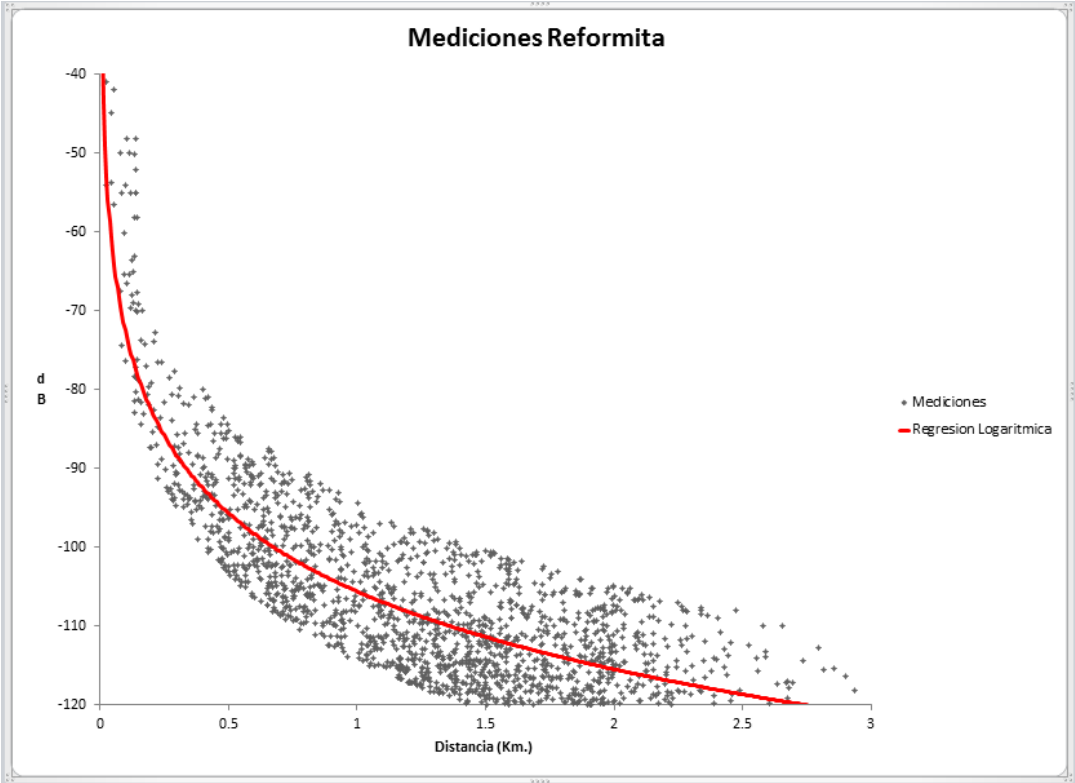


Figura 50. **Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Centro Histórico**



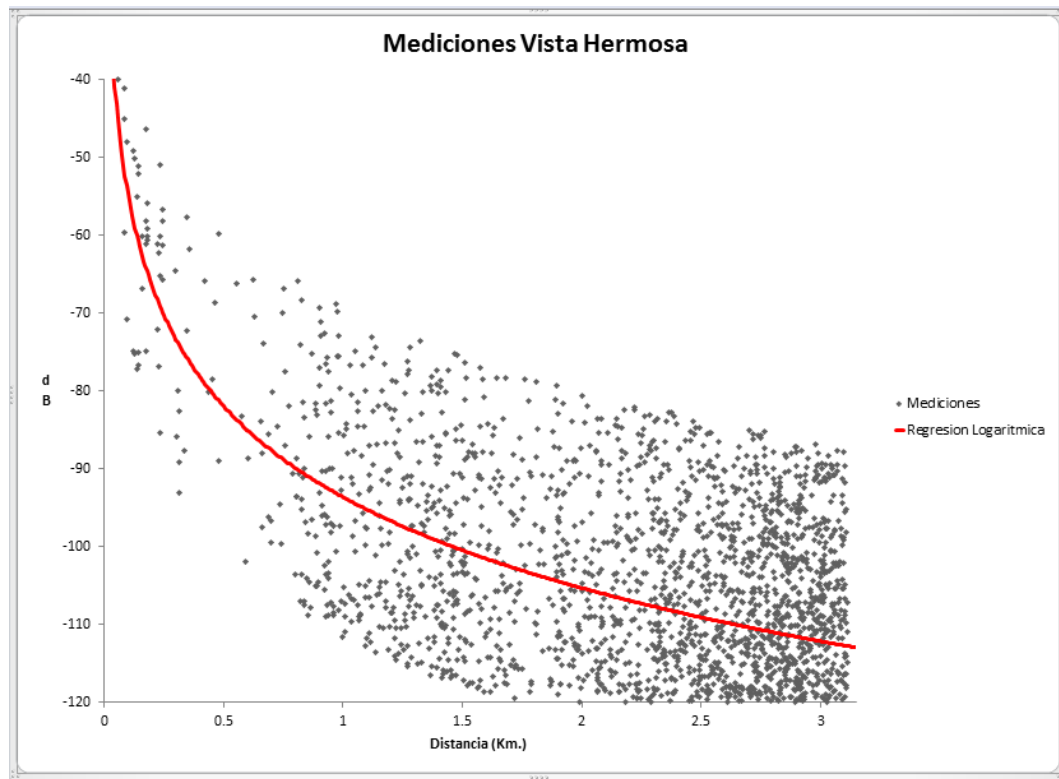
Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 51. Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Reformita



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 52. **Gráfica de la Regresión Logarítmica (rojo), con los valores medidos en campo (gris) para el escenario, Vista Hermosa**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

El procedimiento de experimentación y análisis, fue el mismo para los cuatro diferentes escenarios en estudio.



## 5. VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS

En este capítulo se procede a la verificación de varios de los modelos presentados utilizando las mediciones obtenidas en cada uno de los diferentes escenarios mediante Drive Test en la banda de 1900 MHz. Las mediciones fueron realizadas en cada uno de los diferentes tipos de urbanización, de la ciudad de Guatemala.

Características generales de las mediciones:

- Frecuencia bajo prueba 1943.5 MHz correspondiente al canal 462 de telefonía móvil celular.
- Terreno plano para los tres primeros escenarios (Zona Viva, Centro Histórico y Reformita).
- Terreno semiplano para el escenario Vista Hermosa
- Realizadas en ambientes urbanos
- Predominio de no línea de vista entre la estación base y el móvil
- Altura de la antena transmisora superior a la de los obstáculos tales como edificios adyacentes, árboles, etc. (denominador común en instalaciones de macro celdas de telefonía celular).
- Se quitaron las mediciones inferiores a  $-120$  dBm pues están debajo de la sensibilidad confiable del equipo de medición.

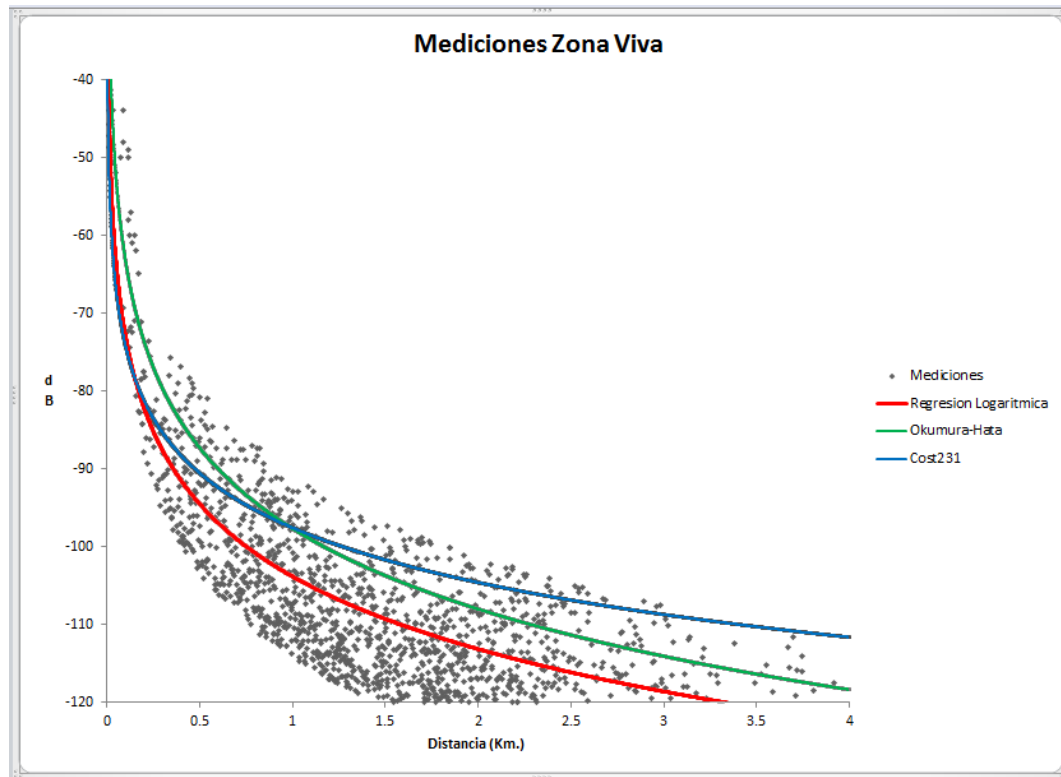
## **5.1. Comparación de cada uno de los modelos en los diferentes escenarios**

Una vez elaborados las diferentes capas incluyendo los datos tomados en campo en cada uno de los escenarios en el proceso citado en el capítulo IV y superpuesto en el mapa de la ciudad de Guatemala, lo que permitió poder geo referenciar las mediciones, con lo que se logró encontrar la distancia promedio entre la estación base transmisora y la receptora, para poder realizar las comparaciones entre los modelos de propagación existentes, que para este estudio se utilizaran el modelo Okumura-Hata y el modelo Cost231, estos por ser los más utilizados en el área geográfica de la ciudad de Guatemala.

### **5.1.1. Escenario Zona Viva**

En la figura 53 se presenta una comparativa entre las mediciones de pérdidas de propagación del trayecto y los tres modelos, para el escenario denominado Zona Viva.

Figura 53. Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Zona Viva



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

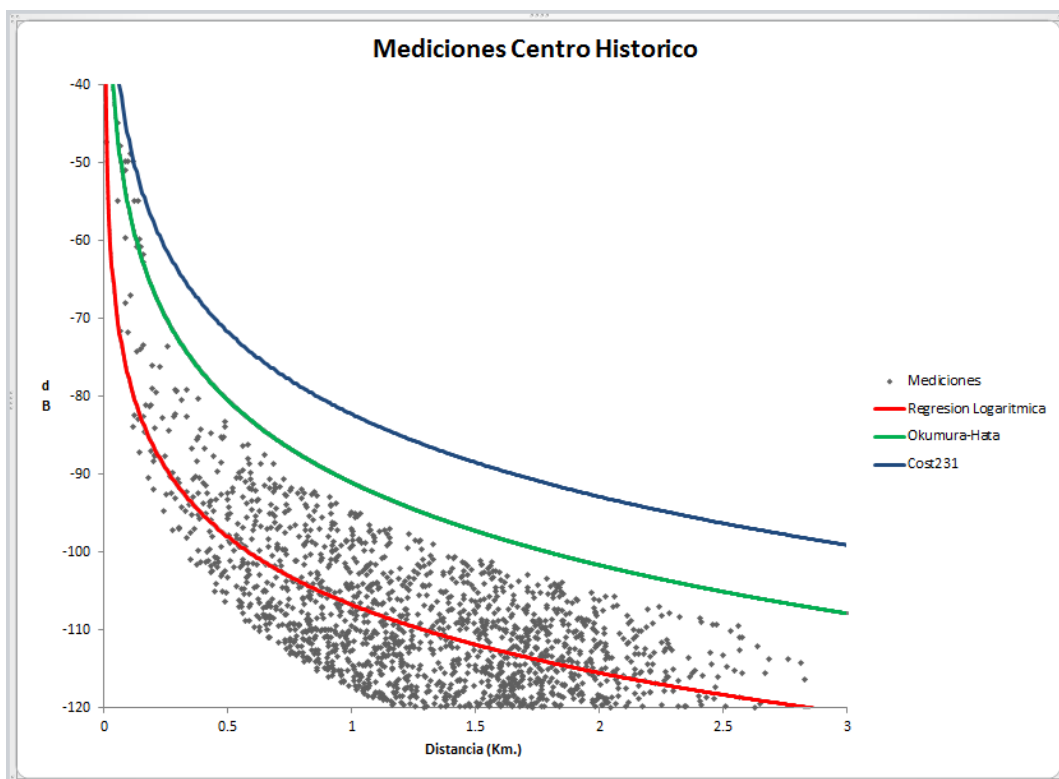
#### Conclusiones:

- El modelo desarrollado para el escenario zona viva se ajusta mejor a las muestras tomadas en campo.
- Para este tipo de morfología, el modelo Okumura-Hata obtiene mejores resultados que el modelo Cost231.

### 5.1.2. Escenario Centro Histórico

En la figura 54 se presenta una comparativa entre las mediciones de pérdidas de propagación del trayecto y los tres modelos, para el escenario denominado Centro Histórico.

Figura 54. Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Centro Histórico



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.



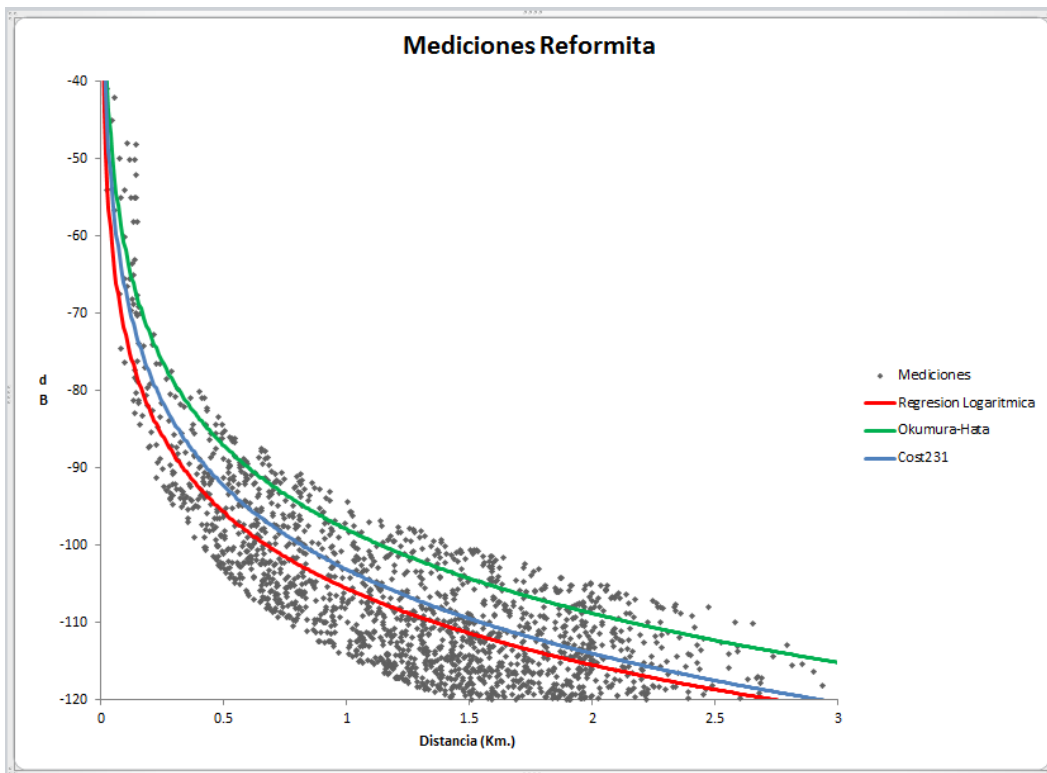
Conclusiones:

- El modelo desarrollado para este escenario se ajusta mejor
- El modelo Cost231 da una estimación demasiado optimista de las pérdidas para este ambiente en particular.
- Para este tipo de escenario, el nivel de señal es atenuado de forma considerable debido al tipo de construcción.

### **5.1.3. Escenario Reformita**

En la figura 55 se presenta una comparativa entre las mediciones de pérdidas de propagación del trayecto y los tres modelos, para el escenario denominado Reformita.

Figura 55. Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Reformita



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

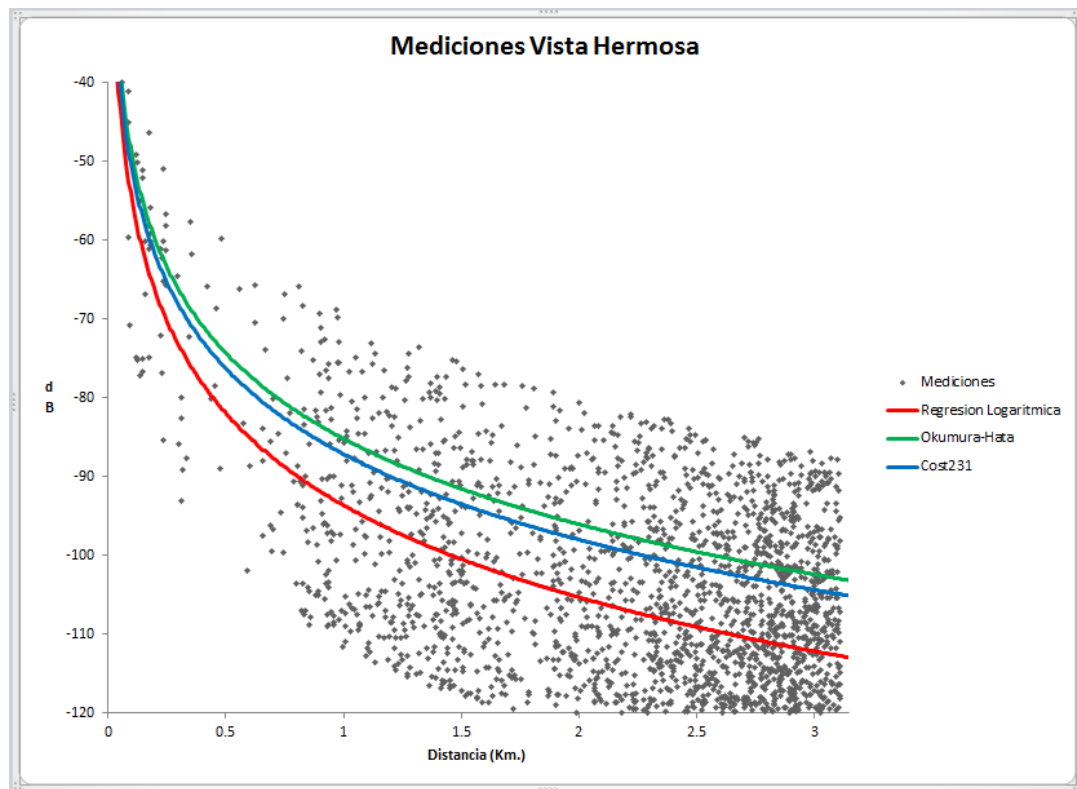
#### Conclusiones:

- Con los tres modelos se obtiene una buena estimación
- El modelo Okumura-Hata da una estimación algo optimista de las pérdidas para el escenario residencial denso.
- Los errores cometidos por los tres modelos son aceptables para el área residencial densa.

#### 5.1.4. Escenario Vista Hermosa

En la figura 56 se presenta una comparativa entre las mediciones de pérdidas de propagación del trayecto y los tres modelos, para el escenario denominado Vista Hermosa.

Figura 56. Comparación entre el modelo de Regresión Logarítmica (rojo), modelo Okumura-Hata (verde) y el modelo Cost231 (azul), escenario Vista Hermosa



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Conclusiones:

- Con los tres modelos se obtiene una buena estimación
- Para escenarios abiertos los modelos Okumura-Hata y el modelo Cost231 dan estimaciones muy buenas.
- Los errores cometidos por los tres modelos son aceptables para el área residencial no densa.

## 5.2. Análisis de los errores cometidos por los tres diferentes modelos.

Para comparar la exactitud de cada uno de los modelos desarrollados con los modelos de Okumura-Hata y el modelo Cost231, se calculó el valor medio del error cometido, su desviación estándar y el error medio cuadrático (tabla V).

### 5.2.1. Valor Medio del Error entre mediciones y los modelos

Para poder encontrar el valor medio del error, se encuentran las diferencias entre cada uno de los modelos, con las muestras tomadas en campo para cada uno de los escenarios, la misma está definida así:

$$\mu_e = \frac{\sum_{i=1}^N L_i \text{ modelo} - L_i \text{ medida}}{N} \quad 5.1$$

Dónde:

$L_i$  : Pérdidas en cada punto

N: Número total de muestras

Es importante recalcar que un modelo exacto debería tener un valor medio del error cercano a cero, valores negativos indicarán que los niveles de señal predichos son inferiores a los medidos y viceversa.

### 5.2.2. Desviación Estándar

Sólo el valor medio del error no sirve como medida de la exactitud del modelo dado que podría tener grandes errores positivos y negativos los cuales se anularían, por esta razón se incluye el cálculo del desvío estándar del error:

$$\sigma_e = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{i \text{ modelo}} - L_{i \text{ medida}} - \mu_e)^2}{N-1} \quad 5.2$$

### 5.2.3. Error Medio Cuadrático

El error medio cuadrático combina el error medio y la desviación estándar.

$$\text{emc} = \sqrt{\mu_e^2 + \sigma_e^2} \quad 5.3$$

Tabla V. **Valor medio del error, desviación estándar y error medio cuadrático. Para cada uno de los diferentes escenarios**

Escenario		Modelo Regresion Logaritmica	Modelo Okumura-Hata	Modelo Cost231
Zona Viva	Error Medio (dB)	0.154	6.124	6.866
	Desviacion (dB)	41.998	42.140	49.558
	emc	<b>41.998</b>	<b>42.583</b>	<b>50.032</b>
Centro Historico	Error Medio (dB)	2.223	17.276	26.073
	Desviacion (dB)	49.626	44.839	44.839
	emc	<b>49.676</b>	<b>48.052</b>	<b>51.868</b>
Reformita	Error Medio (dB)	0.805	8.241	3.037
	Desviacion (dB)	46.249	44.084	44.084
	emc	<b>46.256</b>	<b>44.848</b>	<b>44.189</b>
Vista Hermosa	Error Medio (dB)	-0.115	9.349	7.396
	Desviacion (dB)	137.220	137.486	137.486
	emc	<b>137.220</b>	<b>137.804</b>	<b>137.685</b>

Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 5.3. Consecuencia práctica de los errores

El conocimiento de los errores cometidos es de vital importancia para el planeamiento de una red de telefonía móvil o de servicios inalámbricos. Tanto para el diseño técnico como económico de estas redes es necesario realizar un cálculo ajustado de la cantidad de sitios a instalar para cumplir con los requisitos de cobertura y calidad propuestos; un error en esta etapa puede llevar a colapsar la red, económica o técnicamente.

## CONCLUSIONES

1. Un modelo confiable para predecir la propagación de las ondas de radio, está basado primordialmente en los equipos utilizados en la medición de la potencia recibida en las diferentes calles y avenidas de la ciudad.
2. Se obtuvo con base en mediciones del nivel de potencia en cada uno de los diferentes escenarios de la ciudad de Guatemala un modelo matemático del comportamiento de las señales de radio.
3. Para los diferentes escenarios medidos se calculó el valor medio del error cometido, su desviación estándar y el error medio cuadrático, con lo cual se observa que el modelo de regresión es una muy buena aproximación al comportamiento de las señales de radio.
4. Los modelos Okumura-Hata y Cost231, con los parámetros recomendados dan valores de pérdidas muy optimistas a distancias mayores a 1 km. Para el escenario denominado Zona Viva.
5. Los modelos de Okumura-Hata y Cost231, dan una muy buena predicción en ambientes semiabiertos y abiertos, como se observó en los escenarios Reforma y Vista Hermosa.
6. Los modelos de Regresión, obtenidos en base a mediciones en campo dan una muy buena predicción al comportamiento de la propagación de las ondas de radio.





## RECOMENDACIONES

1. Es de suma importancia que los equipos utilizados para realizar las mediciones estén correctamente calibrados.
2. La antena transmisora, se debe de instalar a una altura mayor que los obstáculos aledaños a la misma tales como edificios, arboles, etc.
3. La velocidad del vehículo al momento de realizar el muestreo debe de ser moderado, esto con el fin que las muestras estén a una distancia entre 15 y 25 mts. una de otra. Una velocidad aproximada de no más de 40 km/h.
4. Se debe tomar en cuenta, la ganancia de la antena receptora, así como también las pérdidas provocadas por cable coaxiales y conectores al momento de la instalación del equipo de muestreo para tener muestras más confiables.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BERTONI, Henry L. *Radio propagation for modern wireless systems*. San Francisco: Prentice Hall, 2000. p. 376. ISBN: 0-13-026373-7.
2. CARDAMA, Ángel; JOFRE, Lluís; RIUS, Juan M. *Antenas*. Barcelona: UPC, 2002. p. 461. ISBN: 84-8301-625-7.
3. COLLIN, Robert E. *Antennas and Radiowave Propagation*. United State of America: McGraw-Hill, 1985. ISBN: 0-07-011808-6.
4. HAYT, William H. *Teoría electromagnética*. México: McGraw-Hill, 1997. ISBN: 0-07-027390-1.
5. HERBERT, Taub; SCHILLING, Donald L. *Principles of communication systems*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN: 0-07-062923-4.
6. JOHNS, Carl T. A. *Teoría electromagnética: campos Y ondas*. Mexico: Limusa, 1981. ISBN: 968-18-1201-8.
7. KRAUS, John D.; FLEISCH, Daniel A. *Electromagnetics with Applications*. 5th ed. United State of America: McGraw-Hill, 1999. ISBN: 0-07-289969-7.
8. OKUMURA, Y.; et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service. Japon: *Review of the Electrical Communications Laboratory*, 1968. vol. 16. p. 825-873.

9. SELGAS BUZNEGO, Virginia. *Análisis matemático y numérico de las ecuaciones de Maxwell*. Tesis doctoral. Oviedo. España. Departamento de Matemáticas, Universidad de Oviedo, 2006. p. 268.
  
10. WALFISCH, J.; BERTONI, H. A Theoretical model of UHF propagation in urban environments. *IEEE Trans.* p. 1788-1796. vol. 36.

## ANEXOS

### ANEXO A: DATOS TÉCNICOS ANTENA ASPP2936E

<b>HORIZONTAL BEAMWIDTH</b>	<b>360°</b>
<b>FREQUENCY RANGE</b>	<b>1850-1990 MHz</b>
	<b>6 dBd / 0° Tilt</b>
<b>MODEL</b>	<b>ASPP2936E</b>
<b>TYPE</b>	<b>Omni</b>
<b>ELECTRICAL SPECIFICATIONS</b>	
<b>Frequency Range (MHz)</b>	1850-1990
<b>Gain (dBd/dBi)</b>	6 / 8.1
<b>Horizontal Beamwidth (Deg.)</b>	360
<b>Elevation Beamwidth (Deg.)</b>	12
<b>Beam Tilt (Deg.)</b>	0
<b>VSWR</b>	<1.5:1
<b>Max. Input Power (Watts)</b>	250
<b>Polarization</b>	Vertical
<b>Connector Location</b>	Bottom
<b>Connector Type</b>	7-16 DIN - Female
<b>Optional Connectors</b>	N Type - Female
<b>MECHANICAL SPECIFICATIONS</b>	
<b>Length (inch/mm)</b>	43 / 1,092
<b>Radome O.D. (inch/mm)</b>	1 / 25
<b>Mast O.D. (inch/mm)</b>	1.5 / 38
<b>Net Weight (lbs/kg)</b>	6 / 2.7
<b>Max. Flat Plate Area (ft<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)</b>	0.22 / 0.02
<b>Max. Wind Load at 100 mph (lbf/N)</b>	12 / 53
<b>Max. Wind Speed (mph/kmh)</b>	125 / 201
<b>Radome Material</b>	Fiberglass
<b>Hardware Material</b>	Galvanized Steel
<b>Color</b>	White
<b>Std. Mounting Hardware</b>	ASPA320 Mounting Clamps

Continuación del anexo A.

**STANDARD SPECIFICATIONS**

VSWR:	< 1.5:1
Impedance:	50 Ohms
Lightning Protection:	DC Ground
Polarization:	Vertical



Side Mounted

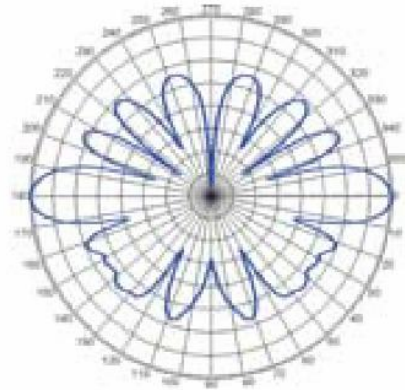


Top Mounted



ASPP2936E

ASPP2936E



Fuente: <http://www.commscope.com/andrew/eng/product/antennas/index.html>. Consulta: septiembre de 2010.